Progress in Superconductivity Vol.10 No.2 pp.92-98 30 April 2009

Hysteresis Loss in a $Sm_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coated Conductor under Simultaneously Applied Field and Current with Phase Differences

Sang Moo Lee[a], Ye Hyun Jung[a], Kisung Kwak[a], Joonkyu Rhee[a], Jaeun Yoo[a], Dojun Youm[*,a], Hosup Kim[b], Hongsoo Ha[b] and Sang Soo Oh[b]

[a] *Department of Physics, KAIST, 305-701 Daejeon, Republic of Korea*

[b] *Superconducting Materials Research Group, KERI, 28-1, Seongju-dong, Changwon, 641-120, Republic of Korea*

(Received 3 March 2009; revised 26 March 2009; accepted 31 March 2009)

위상차를 갖고 변화하는 자기장과 전류가 동시에 가해진 $Sm_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Coated Conductor의 자기이력 손실

이상무[a], 정예현[a], 곽기성[a], 이준규[a], 유재은[a], 염도준[*,a], 김호섭[b], 하홍수[b], 오상수[b]

Abstract

The magnetic field profiles near the surface of a $SmBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor (CC-tape) under magnetic field and current that were applied simultaneously with phase differences ϕs were measured using scanning Hall probe method. Measurements were carried out along the elliptic load lines with ϕ = 90° and 45° for some B_{peak}, I_{peak} values. From the measured field profiles, sheet current density $J(x, B_a, I_a)$ and magnetic flux density $B_0(x, B_a, I_a)$ profiles in the CC-tape were calculated. Using these $J(x, B_a, I_a)$ and $B_0(x, B_a, I_a)$ profiles, we estimated the hysteresis energy loss Q in the CC-tape. The estimated Qs, together with our previous results for ϕ = 0° from [9], were compared with theoretical values based on Brandt's calculation.

Keywords : coated conductor, SmBCO, magnetic hysteresis loss, scanning Hall probe method

I. Introduction

초전도 디바이스에서의 자기이력 손실은 주로 초전도 선재에서 생기는 vortex들의 hysteretic한 움직임에 기인한다 [1]. Vortex들은 초전도체 내부의 자기 선속을 구성한다. 고온초전도 coated conductor(CC-tape)로 구성된 디바이스의 경우, CC-tape의 큰 표면적 때문에 vortex 움직임의 hysteretic한 특성이 매우 두드러져 큰 에너지 손실이 나타나게 된다.

디바이스 내의 CC-tape의 모든 부분에는 교류

*Corresponding author. Fax : +82 42 350 5530
e-mail : djyoum@kaist.ac.kr

전류와 교류 자기장이 동시에 가해지게 된다. 자기장은 디바이스에 흐르는 전체 전류에 의해 만들어진다. 총 에너지 손실은 CC-tape 각 부분에서의 부분적인 에너지 손실을 모두 합해 구할 수 있다. 따라서, 주기적으로 변화하는 외부전류 I_a와 자기장 B_a가 가해질 때, CC-tape의 한 부분에서 나타나는 에너지 손실 특성을 알아내는 것이 필요하다.

I_a와 B_a는 위상차 ϕ를 가질 수 있다. 예를 들어 변압기의 경우, 전류 I_a와 I가 각각 1차와 2차 코일에 흐르면, 어떤 위치에서의 자기장 B_a는 $B_a = \alpha I_a + \beta I$와 같다. 여기서 α와 β는 구조에 의해 결정되는 매개변수로서 B_a의 위치에 따라 변한다. 부하 저항 R은 2차 코일의 출력전압과 $IR = d\Phi / dt$의 관계를 갖는다. 여기서, Φ는 2차 코일의 모든 턴을 통과하는 총 자기 선속이다. Φ는 B_a에 비례하므로 $\Phi = \gamma B_a$와 같이 표현할 수 있고, 구조에 의해 결정되는 계수 γ는 B_a의 위치에 따라 변한다. 이 식들로부터 $\alpha I_a = B_a - \frac{\beta\gamma}{R}\frac{dB_a}{dt}$ 와 같은 관계가 성립한다. 따라서, R이 크면 ϕ는 매우 작고, R이 매우 작으면 ϕ는 ~90°가 된다. 고정된 R에 대해 ϕ는 상수가 되고, B_a-I_a 공간에서 점 (B_a, I_a)는 Fig. 1에서 보여진 것과 같이 타원형 load line 궤도를 따라 주기적으로 움직인다. 이 그림에는 B_a가 양수인 반 주기에 대한 load line만을 나타냈다. 타원 load line은 [ϕ, B_{peak}, I_{peak}]에 의해 결정되는데, B_a와 I_a는 각각 $-B_{peak} \sim B_{peak}$, $-I_{peak} \sim I_{peak}$ 범위에서 ϕ의 위상차를 갖고 변화한다. 45°, 90°의 위상차를 갖는 load line을 그림에 나타내었고, 각 load line에 대한 [ϕ, B_{peak}, I_{peak}] 값들은 그림에 나타낸 것과 같다. B_{peak}와 I_{peak}의 단위는 각각 mT와 A이다. 자기이력 손실에서는 자기장 수직 성분의 기여가 주요하므로 B_a가 CC-tape 표면에 수직으로 가해진 경우만을 고려하였다 [2].

CC-tape의 단위 길이당 자기이력 손실 Q는 전류밀도와 자속밀도 변화량의 곱을 적분하여 구할 수 있다 [3].

$$Q = \int_{-w}^{w} dx \int_{0}^{x} dx' \oint J(x, B_a, I_a) dB_0(x', B_a, I_a) \quad (1)$$

여기서, x는 CC-tape의 폭 방향이고, $2w$는 테이프의 폭이다. $J(x, B_a, I_a)$는 x 에서의 sheet current density이다. $J(x, B_a, I_a)$는 테이프의 길이 방향으로는 일정하다고 가정하였다. $B_0(x, B_a, I_a)$는 초전도 박막의 자속밀도이다. 이 적분은 load line을 따라 B_a, I_a 변화의 한 주기에 대해 적분하여야 한다.

CC-tape의 초전도 박막은 여러 grain들로 이루어지고, 그 결정축은 bi-axial하게 정렬되어 있다. $J(x, B_a, I_a)$는 inter-granular transport current와 magnetization의 공간적인 변화에 의해 결정되는 magnetization current로 이루어져 있다 [4]. 각 grain 내에서 회전하는 intra-granular current에 의해 유도되는 magnetization이 주어지면, 그 크기는 grain 크기에 따라 변한다. Grain 크기는 테이프 폭에 비해 매우 작아서 $J(x, B_a, I_a)$와 $B_0(x, B_a, I_a)$는 여러 grain에 걸친 평균값으로 정의된다.

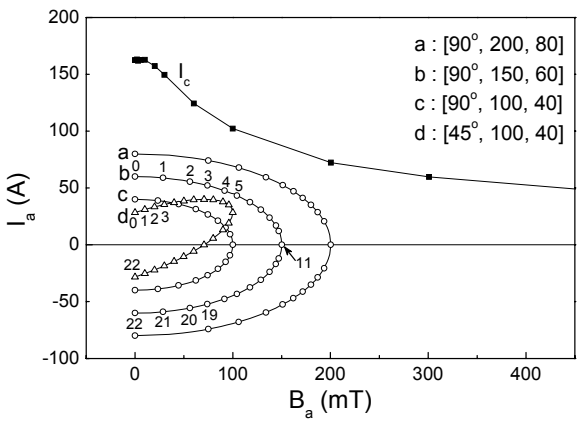

Fig. 1. Half parts of the load lines for the positive values of B_a. The values of [ϕ, B_{peak}, I_{peak}] for the load lines indexed by a, b, c and d are listed. The units of B_{peak} and I_{peak} are mT and A, respectively. The circles and the triangles on the load lines represent the step points of measurement, and the numbers near the points are the step numbers, n. The $I_c(B_a)$ curve is also shown.

Brandt 등과 Clem 등은 단결정과 같이 균일한 구조를 갖는 얇은 띠 형태의 초전도체에서 I_a와 B_a의 특정한 조합에 대해서만 $J(x, B_a, I_a)$와 $B_0(x, B_a, I_a)$의 해석적 계산을 했다 [3, 5]. 하지만, 균일한 초전도 띠에 대한 일반적인 해는 아직 풀리지

않았다. 또한, CC-tape과 같이 granular한 구조를 갖는 얇은 띠 형태의 초전도체에 대해서도 역시 해가 구해진 바 없다 [3]. 따라서, granular film에서의 vortex 움직임의 자세한 특성은 거의 이해되지 못했다. 하지만, 이론적으로 제한된 경우들에 대해, 실험적으로 측정한 데이터로부터 $J(x, B_a, I_a)$를 계산하는 것은 가능하다. CC-tape 시료 표면 근처에서의 자기장을 scanning Hall probe(SHP) 방법을 이용해 측정하여, 그 데이터로부터 $J(x, B_a, I_a)$를 수치적인 inversion 계산을 통해 구할 수 있다 [6-9].

II. Experiments

이번 실험에는 본 연구실의 지난 연구에 사용된 것과 같은 CC-tape 시료와 장치를 사용하였다 [9]. 간략하게, 기판 테이프는 IBAD-MgO textured Hastelloy 기판에 50 *nm* 두께의 $LaMnO_3$ 완충층을 증착하여 만들어졌다. 약 2 μm 두께의 SmBCO 박막은 co-evaporation 방식으로 증착되었고, 그 위에 약 5 μm 두께의 은이 증착되어 있다. 사용된 CC-tape 길이는 30 *mm*, 폭은 4 *mm*이다. X-ray diffraction으로 측정한 in-plane texture는 ~6°-FWHM 정도이다. Self-field에서의 임계전류, I_{c0}는 Fig. 1에 보여진 바와 같이 77K에서 약 162 *A*이다.

CC-tape 표면으로부터 약 $\delta = 400\ \mu m$ 떨어진 위치에서 SHP 방법을 통해 자기장의 수직성분 profile $B_\delta(x, B_a, I_a)$를 측정하였다. 홀 프로브는 x 방향으로 움직이며 스캔한다. SHP 시스템에 대한 자세한 내용은 본 연구실의 지난 논문에 나와있다 [6-9]. 먼저, CC-tape을 액체질소 온도로 zero-field cooling하고, I_a와 B_a를 동시에 가하여 단계적으로 변화시킨다. 각 스텝에서는 I_a와 B_a를 고정시킨 상태에서 SHP 측정을 한다. CC-tape와 Hall probe는 액체질소에 담겨져 온도를 일정하게 유지한다.

Fig. 1에 보여진 각 load line에 대해 SHP 측정이 이루어졌는데, load line 상에 도형으로 나타낸 모든 step point에서 순차적으로 측정을 행하였다. Load line $[\phi, B_{peak}, I_{peak}]$의 각 step point에 대한 B_a, I_a 값은 각각 $B_a = B_{peak} \sin\theta_n$, $I_a = I_{peak} \sin(\theta_n + \pi\phi/180)$와 같이 정해지는데, 여기서 n은 스텝의 순서를 나타내는 것으로, 반주기에 대해 0(첫 번째 스텝)에서 N(마지막 스텝)까지의 값을 갖는다. 예로 load line b, d의 step number n들을 Fig. 1에 나타냈다. 각 점은 SHP 측정의 n번째 스텝에 해당하는 $(B_a, I_a)_n$을 나타낸다. 첫 번째 스텝은 zero-field cooling한 virgin state가 아니고 B_a와 I_a를 load line을 따라 한 cycle을 변화시켜준 후의 상태이다. θ_n은 0에서 π까지 증가하고, B_a와 I_a는 각각 $-B_{peak} \le B_a \le B_{peak}$ 와 $-I_{peak} \le I_a \le I_{peak}$ 범위에서 위상차 ϕ를 갖고 변화한다.

다른 B_{peak}, I_{peak} 값에 대한 새로운 set의 데이터를 측정하기 전에 시료의 온도를 임계온도 이상으로 올려 트랩된 자기장을 모두 제거한 후 다시 zero-field cooling을 하였다.

III. Results and analyses

전형적인 $B_\delta(x, B_a, I_a)$의 예로 $[\phi, B_{peak}, I_{peak}]$이 [90°, 150, 60]인 데이터와 [45°, 100, 40]인 데이터를 각각 Fig. 2a와 3a에 나타내었다. 이것은 각각 Fig. 1의 load line b와 d에 해당한다. 두 개의 수직한 점선은 CC-tape의 가장자리를 나타낸 것으로서, $x = \pm 2\ mm\ (= \pm w)$인 위치이다. 곡선 근처에 적혀있는 숫자는 step number n이다. 첫 번째 스텝 $(n = 0)$과 마지막 스텝 $(n = N)$에 해당되는 $(B_a, I_a)_n$ 값은 각각 $[0, I_{peak} \sin(\pi\phi/180)]_0$과 $[0, -I_{peak} \sin(\pi\phi/180)]_N$인데, 서로 역전되어 있는 모양을 볼 수 있다. 따라서, $n = 0$과 $n = N$에 해당하는 profile은 $B_\delta[x, (B_a, I_a)_0] = -B_\delta[x, (B_a, I_a)_N]$의 관계가 성립한다. 이로부터 $B_\delta(x, B_a, I_a)$의 주기적인 변화를 확인할 수 있다. [90°, 150, 60]의 경우를 보면, 비대칭적인 profile $(n = 0)$에서 대칭인 profile $(n = 11)$을 지나 비대칭적인 profile $(n = 22 = N)$로 변화한다. 이것은 각각 $(0, 60)_0$, $(150, 0)_{11}$, $(0, -60)_{22}$에 해당한다. [45°, 100, 40]인 경우에도 $I_a = 0$인 $n = 15$에서 대칭적인 profile을 나타내고 있다. 따라서, $I_a = 0$일 때에 profile이 대칭적인 모양을 갖는다. 다른 load line에 대한 데이터도 이들과 유사한 형태

를 갖고 있어 그림으로 나타내지 않았다.

이렇게 측정한 $B_\delta(x, B_a, I_a)$ 데이터를 통해 sheet current density $J(x, B_a, I_a)$와 초전도체의 자속밀도 수직성분 $B_0(x, B_a, I_a)$를 계산하고, 그 결과를 이용해 자기이력 손실 Q를 계산할 수 있는데, 그 방법은 다음과 같다.

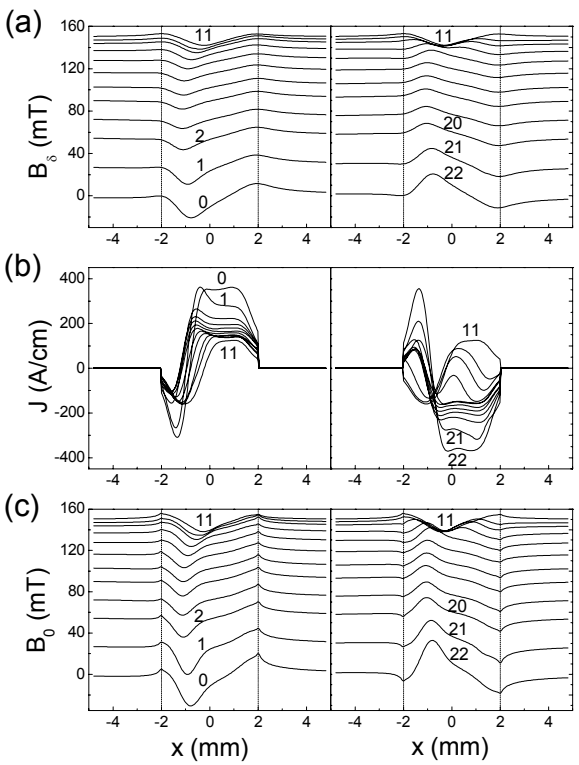

Fig. 2. (a) $B_\delta(x, B_a, I_a)$ for the load line b : [90°, 150, 60]. (b) $J(x, B_a, I_a)$ calculated from $B_\delta(x, B_a, I_a)$ of (a). (c) $B_0(x, B_a, I_a)$ calculated from $J(x, B_a, I_a)$ of (b). The two vertical dotted lines on (a) and (c) indicate the edges of the CC-tape, and the numbers near the curves are the step numbers n.

(A) Calculation of $J(x, B_a, I_a)$

δ = 400 μm에서 측정한 $B_\delta(x, B_a, I_a)$와 $J(x, B_a, I_a)$는 다음과 같은 관계를 갖는다 [3].

$$B_\delta(x, B_a, I_a) = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{-w}^{w} \frac{(x-x')J(x', B_a, I_a)}{(x-x')^2+\delta^2}dx' + B_a \quad (2)$$

이 식의 역을 수치적으로 구함으로써 $J(x, B_a, I_a)$를 구할 수 있는데, Johansen의 계산과정을 reference로 이용하였다 [10-13]. 이 inversion formula를, boundary correction을 해주며 반복적으로 적용하여 개선된 계산을 해낼 수 있다. 자세한 계산과정과 이 inversion method의 유용성은 앞에 언급한 본 연구실의 지난 논문에 나와있다 [6-9].

Fig. 2b와 3b에 Fig. 2a, 3a의 $B_\delta(x, B_a, I_a)$로부터 계산한 $J(x, B_a, I_a)$ profile을 나타내었다. 곡선 근처에 적힌 숫자는 역시 step number이다. 각 데이터에서 $\int_{-w}^{w} J(x, B_a, I_a)dx$ 를 이용해 계산한 총전류는 측정 시에 가해준 I_a와 ~5% 이내로 일치한다. 이를 통해 이 계산의 정확도를 알 수 있다.

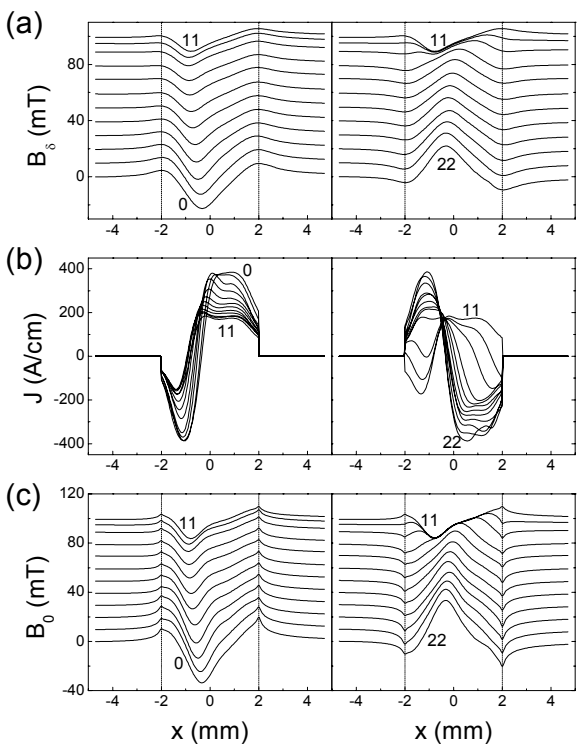

Fig. 3. (a) $B_\delta(x, B_a, I_a)$ for the load line d : [45°, 100, 40]. (b) $J(x, B_a, I_a)$ calculated from $B_\delta(x, B_a, I_a)$ of (a). (c) $B_0(x, B_a, I_a)$ calculated from $J(x, B_a, I_a)$ of (b). The two vertical dotted lines on (a) and (c) indicate the edges of the CC-tape, and the numbers near the curves are the step numbers n.

(B) Calculation of $B_0(x, B_a, I_a)$

식 (2)에서 δ = 0인 경우에 해당하는 초전도체

내의 자속밀도 $B_0(x, B_a, I_a)$는 $J(x, B_a, I_a)$와 다음과 같은 관계를 갖는다 [3].

$$B_0(x, B_a, I_a) = \frac{\mu_0}{2\pi}\int_{-w}^{w} \frac{J(x', B_a, I_a)}{x - x'} dx' + B_a \qquad (3)$$

따라서, (A)에서와 같이 구한 $J(x, B_a, I_a)$를 식 (3)에 대입하여 $B_0(x, B_a, I_a)$를 구할 수 있다. Fig. 2c와 3c에 각각 Fig. 2b, 3b의 전류밀도 분포로부터 구한 $B_0(x, B_a, I_a)$를 나타내었다. 곡선 근처의 숫자는 역시 step number이다. $n = 0$과 $n = N$의 profile이 서로 역전되어있음을 볼 수 있고, 따라서, $B_0[x, (B_a, I_a)_0] = -B_0[x, (B_a, I_a)_N]$가 성립함을 알 수 있다. 모든 profile들이 각각에 해당하는 $B_\delta(x, B_a, I_a)$와 유사하지만, 이 경우에는 시료의 두 가장자리 위치에 뾰족한 peak이 나타난다.

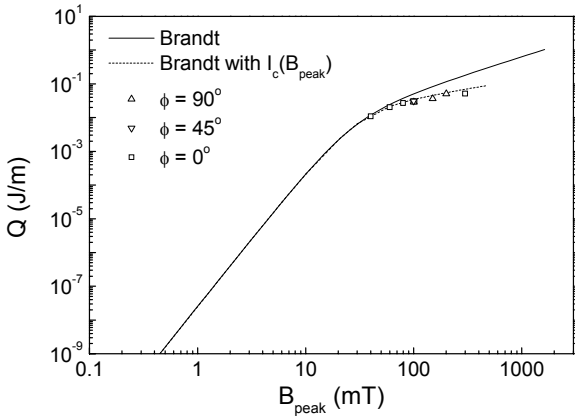

Fig. 4. Log-log plot of $Q(B_{peak})$. The triangles and the squares are the values of Q that were numerically calculated from $J(x, B_a, I_a)$ and $B_0(x, B_a, I_a)$ for the load lines of Fig. 1 (ϕ = 90° and 45°) and for ϕ = 0°, respectively. Data for ϕ = 0° are reproduced from our previous study [9]. The solid line is the result of Brandt's calculation for a superconducting thin strip under a perpendicular magnetic field, and the dotted line is the Brandt's formula with experimentally measured $I_c(B_{peak})$.

(C) Calculation of *Q*

$J(x, B_a, I_a)$와 $B_0(x, B_a, I_a)$로부터 다음과 같은 formula를 사용해 Q를 수치적으로 계산할 수 있다.

$$Q = 2\left[\int_0^w dx\int_0^x dx' - \int_{-w}^0 dx\int_{-x}^0 dx'\right]\sum_{n=0}^{N-1}[B_0(x', I_{n+1}) - B_0(x', I_n)]\frac{[J(x, I_{n+1}) + J(x, I_n)]}{2} \qquad (4)$$

이 formula는 식 (1)에서 J dB_0에 대한 적분을 합으로 바꾼 것이다. Fig. 4는 계산된 Q 값들을 B_{peak}에 대한 함수로 log-log plot한 것이다.

이 그림에서 $\phi = 0°$의 데이터는 앞에 언급한 본 연구실의 지난 논문에서 자기장의 영향이 큰 경우의 데이터들을 가져온 것이다 [9]. 다른 위상차 ϕ에 해당하는 모든 점들이 거의 한 곡선상에 들어오는 것을 볼 수 있는데, 이것은 B_{peak}이 I_{peak}의 self field보다 훨씬 큰 경우, Q는 I_{peak}이나 ϕ에 관계없이 B_{peak}에 의해 결정됨을 의미한다. 예로, 거의 같은 B_{peak} 값을 갖는 [90°, 100, 40], [45°, 100, 40], [0°, 99, 48.6], 그리고 [0°, 101, 17.7]의 Q 값들이 거의 일치한다.

Fig. 4의 실선은 얇은 띠 형태의 초전도에 B_a를 수직으로 가해주었을 때의 Q에 대한 Brandt의 계산 결과로서 $Q_{M,\,\mathrm{Brandt}} = (\mu_0 I_c^2/\pi)\cdot f_M(B_{peak}/B_c)$와 같다. 여기서, 함수 $f_M(y) = 2\ln\cosh y - y\tanh y$이고, $B_c = \mu_0 I_c/2\pi\omega$ 이다 [3]. 이 formula에 사용된 I_c는 self field에서의 I_c, 즉 $I_c(B_a = 0)$이다. 점선으로 나타낸 곡선은 이 formula에서 I_c를 자기장의 함수인 $I_c(B_{peak})$를 사용해 보정한 결과로서, Fig. 1의 $I_c(B_a)$에서 구한 값이다. Brandt의 계산 결과가 100 mT 이상의 고자기장에서의 실험값과 큰 차이를 보이는 것과 달리, 이와 같은 보정을 통한 계산 결과는 실험치에 좀 더 가까운 결과를 보여주고 있으나, 여전히 실험값이 약간 작은 값을 나타내고 있다. 사실, 위의 이론값과의 비교를 통한 분석이 본 실험의 경우에 적절한 것은 아니다. 이번 실험의 조건들이 자기장의 영향이 좀 더 주요한 경우에 해당하나 [3, 9], 위의 formula는 앞에 말한 바와 같이 자기장만을 가해줬을 경우에 대한 계산 결과이고, 단결정과 같은 균일한 시료에 대한 이론이기 때문이다. 하지만, 아직까지는 자기장과 전류를 위상차를 갖고 동시에 가해준 경우나 CC-tape과 같은 granular film의 경우를 잘 설명해 주는 이론은 나와있지 않다.

IV. Concluding remarks

위상차 ϕ를 갖고 변화하는 자기장과 전류를 CC-tape에 가해주며 SHP 방법을 통해 측정한 field profile로부터 자기이력 손실 Q를 구했다. 몇 개의 B_{peak}, I_{peak} 값에 대해 90°와 45°의 위상차를 갖는 load line을 따라 자기장과 전류를 변화시켜 주며 측정을 하였다. 이번 실험의 Q 값들을 본 연구실의 앞선 논문 [9]에 나온, ϕ = 0°이고 자기장 영향이 큰 경우의 데이터와 함께 B_{peak}에 대한 함수로 plot 해보면, 모든 점들이 거의 한 곡선에 들어오는 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 B_{peak}이 I_{peak}의 self field보다 큰 경우, 자기이력 손실이 위상차나 I_{peak}에 관계없이 B_{peak}에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

이렇게 구한 Q 값들을 변화하는 수직자기장 하에 놓인 얇은 띠 형태의 초전도에 대한 Brandt의 계산 결과와 비교해 보았는데, 100 mT 이상의 고자기장에서 큰 차이를 나타냈다. Brandt의 formula에 I-V 측정을 통해 구한, 자기장에 따라 변하는 I_c 값을 대입해 보정해준 결과는 실험값에 더 가깝지만 여전히 실험값이 조금 더 작은 값을 나타내고 있다. 이렇게 자기장과 전류가 동시에 가해진 경우나 CC-tape와 같이 granular 구조를 갖는 시료에 대한 이론적 연구가 아직은 더 필요한 상황이다.

Acknowledgments

This work was supported by the Centre for Applied Superconductivity Technology in the Republic of Korea.

References

[1] M. N. Wilson, Superconducting Magnets, Clarendon Press Oxford (1983).

[2] N. Amemiya, Z. Jiang, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, "Total AC loss of YBCO coated conductor carrying AC transport current in AC transverse magnetic field with various orientations" , Supercond. Sci. Technol., 17, 983 (2004).

[3] E. H. Brandt and M. Indenbom, "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field", Phys. Rev. B, 48 12893 (1993).

[4] W. J. Carr, "Loss in a striated coated conductor", Supercond. Sci. Technol., 20, 168 (2007).

[5] E. Zeldov, J. R. Clem, M. McElfresh and M. Darwin, "Magnetization and transport currents in thin superconducting films", Phys. Rev. B, 49, 9802 (1994).

[6] Jaeun Yoo, Yonghwan Jung, Jaeyoung Lee, Sunme Lim, SangMoo Lee, YeHyun Jung, Dojun Youm, Hosup Kim, Hongsoo Ha and SangSoo Oh, "Scanning Hall probe measurements of field distributions of a coated conductor under applied fields", Supercond. Sci. Technol., 19, 1291 (2006).

[7] Jaeun Yoo, SangMoo Lee, YeHyun Jung, Jaeyoung Lee, Dojun Youm, Rock-Kil Ko and SangSoo Oh, "Calculations of AC current losses and AC magnetic losses from the scanning Hall probe measurements for a coated conductor", Physica C, 468, 160 (2008).

[8] Jaeun Yoo, SangMoo Lee, YeHyun Jung, Jaeyoung Lee, Dzung Nguyen Xuan, Dojun Youm, Hosup Kim, Hongsoo Ha, KyuJeong Song, SangSoo Oh and Sangjun Oh, "The effects of a magnetic field dependent critical current on the hysteresis loss of a coated conductor", Supercond. Sci. Technol., 21, 085020 (2008).

[9] Jaeun Yoo, SangMoo Lee, Yehyun Jung, Kisung Kwak, Joonkyu Rhee, Dojun Youm, Hosup Kim, Hongsoo Ha, SangSoo Oh and Sangjun Oh, "Estimation of hysteresis loss in $Sm_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ coated conductor via scanning Hall probe measurements with simultaneously applied field and current", Supercond. Sci. Technol., 22, 045001 (2009).

[10] T. H. Johansen, M. Baziljevich, H. Bratsberg, Y. Galperin, P. E. Lindelof, Y. Shen and P. Vase, "Direct observation of the current distribution in thin superconducting strips using magneto-optic imaging",

Phys. Rev. B, 54, 16264 (1996).

[11] M. E. Gaevski, A. V. Bobyl, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, T. H. Johansen, M. Baziljevich and H. Bratsberg, "Magneto-optical study of magnetic-flux penetration into a current-carrying high-temperature-superconductor strip", Phys. Rev. B, 59, 9655 (1999).

[12] L. Lucarelli, G. Luepke, T. J. Haugan, G. A. Levin and P. N. Barnes, "Time-resolved magneto-optical imaging of $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ thin films in high-frequency AC current regime", Supercond. Sci. Technol., 19 667 (2006).

[13] A. V. Bobyl, D. V. Shantsev, Y. M. Galperin, T. H. Johansen, M. Baziljevich and S. F. Karmanenko, "Relaxation of transport current distribution in a YBaCuO strip studied by magneto-optical imaging", Supercond. Sci. Technol., 15, 82 (2002).