

외부자계의 인가방향에 따른 HTS 선재의 자화손실 특성

박명진, 임형우, 최명섭, 차귀수, 이지광*
 순천향 대학교, *우석 대학교

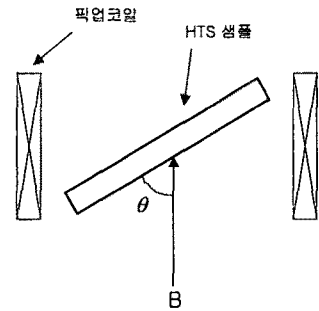
Magnetization Loss Characteristics of HTS Tapes in AC External Magnetic Fields Applied in Different Orientations

Myungjin Park, Hyoungwoo Lim, Myeongseob Choi, Guesoo Cha, Jikwang Lee*
 Soonchunhyang University, *Woosuk University

Abstract - Magnetization losses of HTS depend strongly on the orientation of external magnetic field because of anisotropy characteristics. For parallel and perpendicular magnetic field, analytical models to calculate the loss are well known but there is no analytical model for magnetic fields which are applied to surface of HTS with arbitrary angle.

In this paper, magnetization losses are measured for various incidence angles (15°, 35°, 45°, 60°) and compared with parallel and perpendicular loss. As a result, magnetization losses in HTS are strongly affected by perpendicular magnetic field component of external magnetic field.

방향에 따라 다른 손실 특성을 보인다. 일반적으로 선재의 넓은 면에 수직으로 인가될 때와 수평으로 인가될 때를 각각 수직방향, 수평방향 자화손실 이라고 한다.



1. 서 론

그림 1. 외부인가자장 B의 입사각도 theta와 픽업코일, 샘플의 배치

현재 전력기기 응용에서 사용하고 있는 고온초전도선재의 손실은 크게 통전손실과 자화손실로 분류할 수 있다. 자화손실은 초전도 결정체의 이방성 특징으로 인해 외부에서 인가되는 자장의 입사각도에 의해 다른 손실특성을 지니게 된다. 일반적으로 초전도선재의 넓은면에 수직으로 인가되는 수직방향손실과 평행하게 인가되는 수평방향에 의한 손실은 strip 모델과 slab 모델을 사용하여 해석적으로 계산할 수 있고, 측정결과도 비교적 두 모델과 잘 일치함이 많은 연구를 통해 확인되었다. 그러나 실제 초전도선재를 이용한 대부분의 경우에 있어 외부로부터 인가되는 자장의 방향이 항상 수직과 수평인 경우는 극히 드물며, 대부분이 임의의 입사각을 지니는 형태로 초전도선재에 인가되어진다. 불행히도 아직까지 임의의 입사각을 지니는 경우에 있어서 해석적인 방법이 연구되지 않았기 때문에, 이러한 부분에 있어서는 실제 실험을 통한 측정자료를 기반으로 실험식의 형태로써 인가자장의 방향에 따른 자화손실을 나타내고 있다. 많은 연구에서 임의의 입사각을 지닌 인가자장을 수직과 수평 성분으로 나누어 각각의 성분에 대한 자화손실을 계산하고 전체 자화손실을 두 성분에 의한 자화손실들의 합으로 나타내고 있지만, 이는 어떤 물리적 배경과 해석적 배경도 지니고 있지 않다. [1]

그림 1은 고온 초전도 선재에 임의의 방향으로 가해지는 외부자장 B와 샘플의 배치를 나타내고 있다. 그림 1에서 인가자장이 선재의 넓은 면에 대해서 각도 theta=0°일 때가 수평방향, theta=90°일 때가 수직방향의 외부자장을 나타낸다. 수평방향으로 외부자장을 인가할 때에 발생하는 단위체적당 손실은 외부인가자장이 완전 침투자장 이하일 때와 이상일 때를 구분하여 slab 모델의 식으로 나타내면 다음과 같다.

본 논문에서는 현재 많이 사용하고 있는 BSCOO 선재의 인가자장 방향에 따른 자화손실을 측정, 분석하여 자화손실에 대한 실험식을 확립하기 위한 기반자료를 구축하고자 한다.

$$P_{||} = \frac{2 B_p^2}{\mu_0} \beta_{||}^3 \quad B < B_p$$

$$P_{||} = \frac{2 B_p^2}{\mu_0} \left(\beta_{||}^3 - \frac{2}{3} \right) \quad B > B_p \quad (1)$$

여기서 B는 선재에 수평으로 인가하는 외부자장, Bp는 완전침투자장, beta_|| = B/Bp이다. 수직방향의 외부인가자장에 의한 자화손실은 strip 모델의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{\perp} = K \frac{4\pi a^2}{\mu_0 S} B_c B \left[\frac{2}{\beta_{\perp}} \ln(\cosh \beta_{\perp}) - \tanh \beta_{\perp} \right] \quad (2)$$

여기서 beta_perp = B/Bc, Bc = (2*mu_0*Jc*b)/pi, S는 선재의 단면적, B는 선재에 수직하게 인가되는 외부자장, K는 고온 초전도 선재의 형상을 나타내기 위한 변수이며 본 논문에서는 1로 보았다.

고온 초전도 선재에 그림 1과 같이 HTS 샘플의 넓

2. 본 론

2.1 해석 모델

고온초전도선재는 BSCOO 결정체의 이방성 특징으로 인해 외부의 인가자장이 고온 초전도 선재에 입사하는

은 면에 θ 의 각도로 인가되는 외부자장에 대한 자화손실은 다음과 같은 방법으로 나타내었다.

$$P = P_{//} \cos^2 \theta + P_{\perp} \sin^2 \theta \quad (3)$$

여기서 $P_{//}$ 와 P_{\perp} 는 각각 식 (1)과 (2)로부터 계산되어진 결과이다. [2]

2.2 실험장치 및 방법

고온초전도선체에 외부로부터 자장이 인가되면 초전도체에서 외부자장에 반하는 자장이 발생되어 초전도체에 히스테리시스 손실을 발생시키며 이때 발생한 손실이 자화손실이 된다. 고온 초전도 선체 샘플에서 발생하는 자장을 측정하기 위해 샘플 주변에 픽업코일을 감아 이때 발생하는 자장을 측정하였다. 샘플로부터 발생한 자장만을 측정하기 위해 픽업코일과 동일한 턴수를 가진 상쇄코일을 이용해 외부자장으로 인해 발생하는 유기전압을 상쇄시켜 순수하게 샘플로부터 발생한 자장만을 측정한다. 이때 픽업코일에 유기 되는 전압 e 는 다음과 같다.

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

여기서 N 은 픽업코일의 턴수이다. 또한 외부자장 인가용 전자석으로부터 발생하는 자장을 측정하기 위해 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$H = \frac{1}{\mu_0} \times K \times I \quad (5)$$

여기서 K 는 자석상수 (T/A)이고, I 는 외부자장 인가용 전자석에 흐르는 전류 (A)이다.

선체에 인가된 외부자장에 의한 자화손실은 H 의 변화에 따른 M 의 값을 1주기 동안 적분하여 나타낼 수 있다.

$$P = \int_0^{1/f} M dH \quad (6)$$

본 논문에서는 고온초전도선체가 위치하는 곳에서 일정한 자장을 인가해 주기 위해 공극의 길이가 40(mm)인 레이스트랙형의 전자석을 사용하였으며, 레이스트랙형 전자석의 자석상수는 $3.651 \times 10^{-3} (T/A)$ 이다. 고온초전도선체의 샘플로부터 발생하는 자장을 측정하기 위해 각각 12턴의 픽업코일과 상쇄코일을 사용하였다. 고온초전도선체의 샘플은 픽업코일내에 위치하며, 샘플에 임의의 각도를 지닌 자장을 인가하기 위해 픽업코일 내부에 샘플을 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 배치시켰다. 여기서 0° 는 인가자장에 샘플의 넓은 면이 수평하게 배치되는 각도이고, 90° 는 수직하게 배치되는 각도이다. 표 1은 실험에 사용된 고온초전도선체의 사양을 나타내고, 그림 2는 자화손실측정을 위한 회로도를 나타낸다.

표 1. HTS 선체의 사양

항 목	특 성
조 성	Bi-2223
폭	4.1(±0.2)mm
두께	0.203(±0.02)mm
I_c	120A

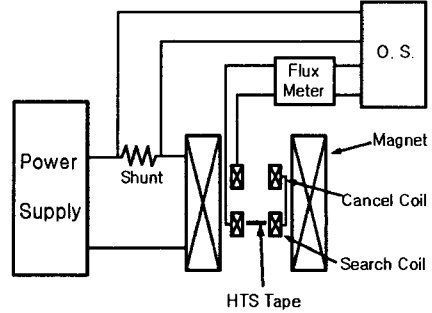


그림 2. 자화손실 측정을 위한 회로도

2.3 실험결과

선체에 인가하는 외부자장의 크기를 0.01~0.12(T)까지 변화시키면서 고온초전도 선체에서 발생하는 자화손실을 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 의 외부자장이 인가되는 각도별로 측정하였다. 그림 3은 인가자장의 변화에 따른 자화손실을 각도별로 측정된 그래프이다. 그림 4와 5는 외부자장의 인가 방향이 30° 이하인 경우와 45° 이상인 경우에 대하여 측정치와 식(3)에 의한 계산치의 자화손실을 나누어서 비교한 그래프이다. 외부 인가자장이 선체에 수직방향으로 인가된 90° 의 경우는 식(2)의 계산치와 잘 일치하고 수평인 0° 인 경우에는 0.05 (T)이하인 경우에는 식(1)의 계산치와는 잘 일치하지 않음을 확인할 수 있었다.

식(3)에서 $n \neq 0$ 경우에는 n 를 포함하고 있는 우변 $P_{//} \cos^2 \theta + P_{\perp} \sin^2 \theta$ 의 계산값이 현저히 감소하여 측정값과의 비교가 어렵기 때문에 $n=0$ 로 하여 측정값과 비교해 보았다. 그림 4에서 외부자장의 크기가 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1(T) 일 때, 초전도 선체의 샘플에 수직방향인 90° 에 대한 45° 의 손실비의 차이가 각각 46.8, 33.8, 24, 17.3, 13.7 (%)로 감소했다. 외부자장이 커질수록, 초전도 선체에 인가되는 외부자장의 각도가 30° 이상인 경우에 대해 손실의 차이가 큰폭으로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 또한, 손실곡선의 전체적인 기울기가 90° 와 유사함을 확인할 수 있다.

그림 5에서 0° 와 15° 에 대한 계산값은 0.02 (T) 이하에서 자화손실의 크기가 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 0.05(T)이하에서는 15° 의 인가자장에 대한 전체손실값을 결정하는 수직방향과 수평방향 성분 중에서 수평방향의 손실이 지배적이기 때문이다. 그러나 30° 일 때를 보면 수직방향 성분의 손실값이 더욱 크기 때문에 자화손실 곡선의 기울기가 수직방향과 유사해짐을 알 수 있다. 또한 측정값을 보면, 외부자장의 전 영역에 대해서 계산치와는 다르게 전부 수직방향의 기울기를 추종하고 있음을 알 수 있고, 자화손실의 크기가 약간의 수직방향 성분만 존재하여도 수평방향에 비하여 두드러지게 증가함을 알 수 있다.

그림 6과 7은 외부인가자장의 크기가 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10(T) 일 때 수직방향에 대하여 각도별로 정규화 한 자화손실을 나타내고 있다. 외부인가자장의 크기가 0.04(T) 이하인 그림 6에서 0.01, 0.02, 0.04(T)인 경우에 $P(\theta)/P(90^\circ) = 0.5$ 가 되는 각도는 측정값에서 각각 $50^\circ, 48^\circ, 34^\circ$ 이고, 계산값에서는 $54^\circ, 50^\circ, 42^\circ$ 로 평균적으로 6.3° 의 차이를 보이고 있다. 또한 그림 6과 같은 낮은 외부자장에 대한 각도별로 정규화 된 자화손실의 곡선은 30° 이상에서 인가자장별로 비교적 일정한 기울기를 가지고 변화함을 알 수 있다.

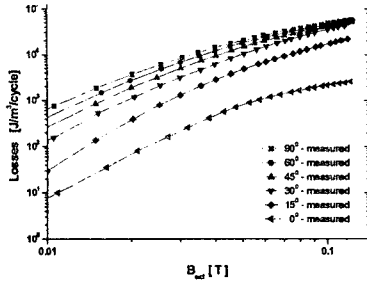


그림 3. 외부자장의 변화에 따라 각도별로 측정된 자화손실.

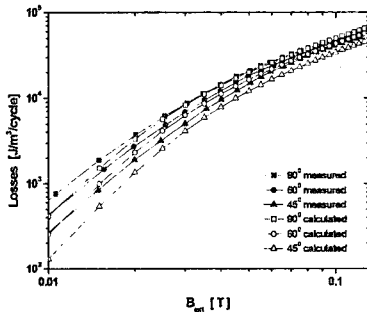


그림 4. 외부자장의 인가방향이 45°이상인 경우의 자화손실의 계산치와 측정치의 비교.

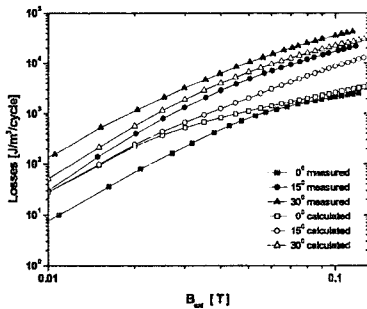


그림 5. 외부자장의 인가방향이 30°이하인 경우의 자화손실의 계산치와 측정치의 비교.

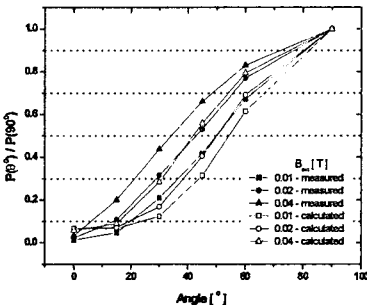


그림 6. 외부자장의 크기가 0.01, 0.02, 0.04(T)일 때 수직방향에 대해 각도별로 정규화한 자화손실.

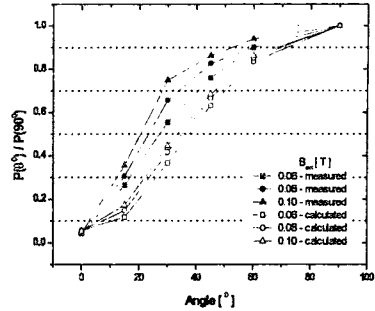


그림 7. 외부자장의 크기가 0.06, 0.08, 0.10(T)일 때 수직방향에 대해 각도별로 정규화한 자화손실.

그림 7에서는 $P(\theta)/P(90^\circ)=0.5$ 가 되는 각도가 측정값에서 각각 $40^\circ, 34^\circ, 28^\circ$ 이고, 계산값에서는 $50^\circ, 48^\circ, 46^\circ$ 으로써 평균적으로 14° 의 차이를 보이고 있으며, 그림 6의 낮은 인가자장의 영역에서 보다 약 8° 정도 더 많은 차이를 나타내고 있다. 또한 인가자장별 기울기는 0.10(T)의 경우에 30° 이상에서는 비교적 완만함을 볼 수 있고, 30° 이하에서는 상당히 급격해짐을 볼 수 있다. 이는 자화손실에서 수직방향의 자화손실이 전체손실에 대해 지배적인 영향을 미치고 있음을 나타내고 있는 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 외부자장의 인가방향에 따른 고온초전도선재의 자화손실을 측정하고 인가방향에 따른 영향을 확인하였다. 측정결과, 고온초전도선재의 자화손실 특성은 전 영역에 걸쳐 인가자장의 수평과 수직방향 성분중에서 수직방향성분의 영향이 지배적이었음을 확인할 수 있었고, 인가자장의 크기가 커질수록 자화손실의 크기는 수직방향성분에 의한 영향이 낮은 영역의 인가자장에서 보다 더욱 증가하고 있음을 확인하였다.

[감사의 글]

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-042-E00021)

[참 고 문 헌]

[1] J.J. Rabbers, "AC Loss in Superconducting Tapes and coils.", Twente University, 2001.
 [2] A. Wolfbrandt, N. Magnusson and S. Hornfeldt, "AC Losses in a BSCCO/Ag Tape Carrying AC Transport Currents in AC Magnetic Fields Applied in Different Orientations.", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 4. pp4123-4127, 2001.