

## YBCO CC 적층선재의 수직자화 손실 값을 이용한 임의 방향 자화손실 평가

이지광<sup>\*</sup>, 임형우<sup>\*</sup>, 차귀수<sup>\*</sup>, 박명진<sup>\*\*</sup>

우석대학교, <sup>\*</sup>순천향대학교, <sup>\*\*</sup>기초전력공학공동연구소

### Magnetization loss characteristics at arbitrary directional magnetic field by perpendicular magnetization loss in YBCO CC stacked conductors

Ji-kwang Lee, Hyungwoo Lim<sup>\*</sup>, Guesoo Cha<sup>\*</sup> and Myungjin Park<sup>\*\*</sup>  
Woosuk University, <sup>\*</sup>Soonchunhyang University, <sup>\*\*</sup>KESRI

**Abstract** - 대부분의 초전도 전력기기의 경우, 초전도 테이프를 솔레노이드나, 팬케익 형태로 권선해서 사용하게 되고, 이러한 경우에는 권선을 구성하는 테이프들에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자계는 권선내의 각각의 테이프에 임의 방향의 외부 인가자계로 작용하여 자화손실을 발생시키므로 초전도 코일에서의 교류손실을 평가하고 예측하기 위해서는 임의방향 자장에 의한 자화손실에 대한 데이터가 필요하다. 수직 자화손실에 대한 측정값으로서 임의방향 자장에 의한 자화손실을 알 수 있다면 코일의 교류손실 평가는 훨씬 쉽게 접근할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 측정된 자화손실 값들로부터 각 방향 인가자계에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 및 수평방향 성분에 의한 자화손실 측정값의 합과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다.

#### 1. 서 론

초전도선재는 교류자장에서 사용될 경우 초전도체의 반자극 특성으로 인해 필연적으로 히스테리시스손실이 발생하게 되며, 특히 이방성의 전기적 특성을 갖는 고온초전도체의 전류 통전능력을 키우기 위해 박막 형태로 제작된 고온초전도선재는 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가되면 매우 큰 자화손실을 동반하게 된다. 이러한 교류손실은 냉동기의 냉각능력 및 기기 운전효율 등과 직접적으로 관계되므로, 초전도의 교류전력기기에의 응용 가능성을 판단하는 주요 요소라 할 수 있다[1].

초전도전력기기는 일반적으로 초전도선재를 권선한 코일형태로 사용되며, 코일 여자 시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생하고, 이러한 임의 방향의 자장은 외부 인가 자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화손실을 발생시킨다. 특히 초전도선재의 넓은 면에 수직으로 가해지는 자장이 코일 전체의 교류손실을 주도하게 되므로 이러한 수직자장에 의한 초전도선재의 자화손실을 예측하고 가능한 수직자장을 줄일 수 있는 코일구조 설계는 초전도 전력기기 설계의 중요한 고려사항이라 할 수 있다[2],[3].

대용량의 초전도 전력기기는 대전류 통전이 필요하고, 단일 YBCO CC로서는 통전요구 전류용량을 만족할 수 없으므로 여러 개의 YBCO CC를 적층하여 사용하여야 한다. 또한, 단일선재로 코일을 권선하였다 할지라도 여러 층으로 권선된 코일은 여자 시 발생된 자장의 입장에서 보면 적층된 선재의 경우와 같이 생각할 수 있으므로 적층선재에서의 자화손실 연구가 필요하다. 본 논문에서는 YBCO CC 단일선재, 2적층, 3적층, 4적층선재 샘플에 대해 외부자장이 샘플의 넓은 면에 30°, 45°, 60°, 90°(수직)방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 각 방향 인가자계에 의한 자화손실과 인가된 자장의 수직방향 성분에 의한 자화손실 측정값과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴 보았다. 이러한 측정값들을 통한 임의방향 자장에서의 자화손실 평가는 실제의 초전도 코일에서 자화손실의 계산에 사용될 수 있으므로 초전도 교류전력기기 설계 및 제작 코일의 손실 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

#### 2. 자화손실 측정 및 결과분석

##### 2.1 측정 및 분석방법

표 1은 실험에 사용한 단일 YBCO CC의 사양과 실험 샘플 중 4 적층선재의 단면을 보여준다. 금속층인 Ag의 두께는 1.2μm이고 YBCO 층은 1μm, 완충층 2.04μm이며 기판층 60μm이다. YBCO Coated Conductor의 폭은 8mm로 가로대 세로의 비율이 8000 : 1로 매우 크다. 단일 YBCO CC의 임계전류는 166A로 측정되었다.

고온초전도선재의 자화손실은 균일한 외부자장을 고온초전도선재의 샘플에 인가할 때 발생하는 에너지의 유출임으로부터 얻을 수 있으므로 1주기 당, 단위길이 당 자화손실은 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_m = \oint \vec{E} \times \vec{H} ds \quad (1)$$

〈표 1〉 실험에 사용된 YBCO CC의 사양 및 4적층선재 샘플모델

Ag층	1.2μm
YBCO층	1μm
완충층	2.04μm
기판층	60μm
Ic(77K, self field)	166A

Ag(1.2 μm)
YBCO(1.0 μm)
Buffer(2.04 μm)
Substrate(60 μm)
Ag(1.2 μm)
YBCO(1.0 μm)
Buffer(2.04 μm)
Substrate(60 μm)
Ag(1.2 μm)
YBCO(1.0 μm)
Buffer(2.04 μm)
Substrate(60 μm)
Ag(1.2 μm)
YBCO(1.0 μm)
Buffer(2.04 μm)
Substrate(60 μm)

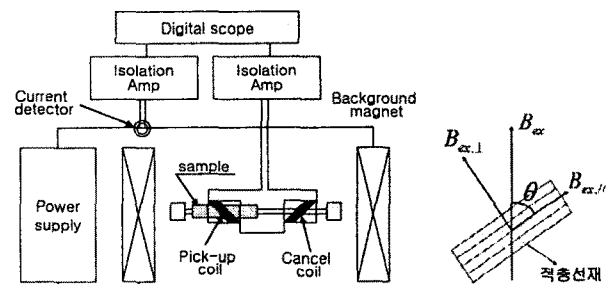
여기서,  $\vec{E}$  은 샘플을 따라 발생된 전계,  $\vec{H}$  는 외부 인가자계의 세기이다.

식(1)을 측정된 전압, 전류 신호를 이용하여 고온초전도선재의 1 주기 당, 단위체적 당 자화손실로 표현하면 식(2)를 얻을 수 있다.

$$Q_m = \frac{C_{pu}k}{V_s} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2)$$

여기서,  $k$  는 자장인가용 코일자석의 단위전류당 발생 자속밀도를 나타내는 자석상수이고,  $C_{pu}$  는 픽업코일 보정상수,  $V_s$  는 샘플의 체적이다.

그림 1은 자화손실 측정을 위한 회로도 및 실험 샘플에 대한 임의 방향 외부인가 자장에서의 수직, 수평 방향 자장성분을 보여준다. 샘플은 픽업코일 내부에 위치하며, 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기 위해 픽업코일과 동일한 턴 수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.



〈그림 1〉 자화손실 측정 회로도 및 임의 방향 인가자장에 의한 수직, 수평자장 성분

초전도 코일 여자 시 코일의 각 부분에서는 선재에 대해서 임의 각도의 자장이 외부자장으로서 작용하게 되므로 코일에서 발생하는 자화손실을 샘플에서 측정된 자화손실 값을 이용하여 구하기 위해서는 임의 방향의 인가자장에 의한 샘플의 손실 측정값이 필요하게 된다. 그러나, 임의방향 자장에 의한 자화손실을 인가자장의 수직, 수평 방향의 자장성분에 의한 자화손실 데이터로 예측할 수 있다면, 샘플에 대한 각각의 각도에서의 자화손실 측정값이 수직자장과 수평자장에 의한 자화손실만 측정하면 된다. 여기서는 YBCO CC에 대해 측정된 30°, 45°, 60°의 각도별 자화손실 값과 각 각도별 인가자장의 수직방향 자장성분 값에 대한 수직(90°) 자화손실 측정값과 크기 관계를 살펴봄으로써 임의방향 인가자장에 의한 자화손실을 수직 자화손실로서 모의 할 수 있는지 알아본다. 임의 방향 자장의 수직( $B_{ax,1}$ ), 수평( $B_{ax,2}$ ) 성분은 식(3)과 같고, 각 성분자장 값에서의 수평, 수직 자화손실 합은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

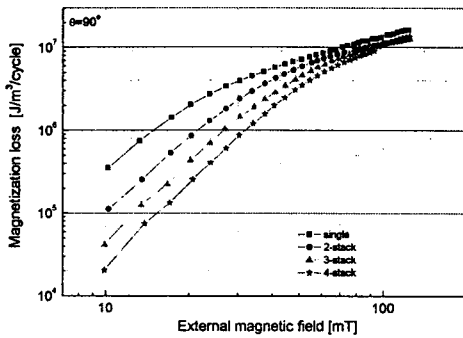
$$B_{e,x,\perp} = B_{e,x} \sin\theta, \quad B_{e,x,\parallel} = B_{e,x} \cos\theta \quad (3)$$

$$Q(\theta, B_{e,x}) = Q(90^\circ, B_{e,x,\perp}) + Q(0^\circ, B_{e,x,\parallel}) \quad (4)$$

여기서,  $B_{e,x}$ 는 외부 인가자장,  $\theta$ 는 외부 인가자장의 각도로서 그림 1의 표시와 같다. 식(4)에서  $Q(90^\circ, B_{e,x,\perp})$ 는  $\theta=90^\circ$ 의 자화손실 측정값에서 외부 인가자장이  $B_{e,x,\perp}$ 일 때의 자화손실 값이고,  $Q(0^\circ, B_{e,x,\parallel})$ 는 샘플의  $\theta=0^\circ$ 의 자화손실 측정값에서 외부 인가자장이  $B_{e,x,\parallel}$ 일 때의 자화손실 값이다. YBCO CC의 경우에는 수평 방향성분에 의한 자화손실은 YBCO CC의 두께가 1 $\mu\text{m}$ 이고, 이를 통과하는 자속량이 매우 작아 수직 자화손실에 비해 매우 작으므로 (1% 이내) 무시할 수 있다.

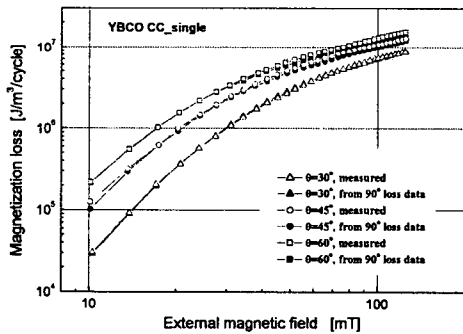
## 2.2 측정결과 및 임의방향 자화손실 평가

그림2는 YBCO CC 단일선재, 2, 3, 4적층선재에 대한 수직방향 자장인 가시의 자화손실 측정결과를 자화손실 밀도(단위체적당 자화손실)로 비교하여 나타낸 결과이다. BSCCO 테이프 선재에서의 마찬가지로 적층 개수가 증가할수록 적층에 의한 자기차폐 영향에 의한 손실밀도 감소 효과가 커짐을 알 수 있으며, 그래프에서 손실 증가 패턴이 변하는(기울기가 변하는) 외부 인가자장의 크기, 즉 완전침투자장이 적층개수 증가에 따라 커짐을 확인할 수 있다.

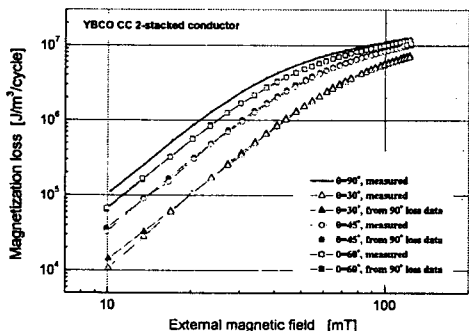


〈그림 2〉 YBCO CC 단일, 2,3,4적층선재의 수직 자화손실 측정결과

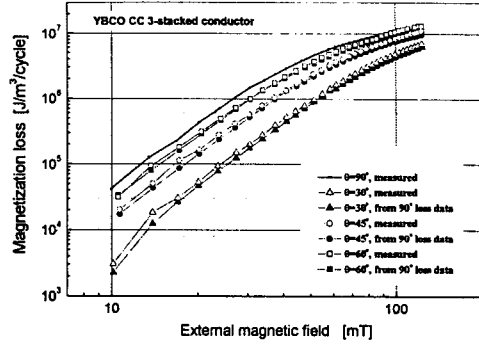
그림3은 단일 YBCO CC의 외부자장이 30°, 45°, 60°의 방향으로 가해지고 있을 때의 자화손실 측정값과, 각 방향 인가자장 중 수직성분 자장 값에 대한 90°(수직)방향에서의 수직 자화손실 측정값을 비교하였다. 그림4, 그림5, 그림6은 각각 2적층, 3적층, 4적층선재에 대한 측정결과 비교이다. 결과에서 알 수 있듯이 모든 샘플에 대해 비교결과가 잘 일치함을 알 수 있다.



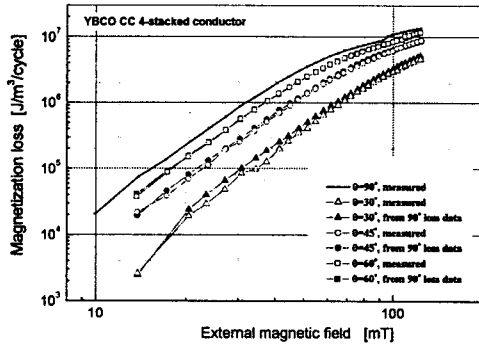
〈그림 3〉 단일선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교



〈그림 4〉 2적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교



〈그림 5〉 3적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교



〈그림 6〉 4적층선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직성분 자장에서의 자화손실 측정값 비교

BSCCO 테이프선재에 대한 자화손실 연구에서는 두 결과가 차이가 있어서, 임의방향 자장에 의한 자화손실을 수직 자화손실로서 예측하는 데 있어 60° 이하의 외부자장에 대해서는 잘 일치하지 않았으나[3],[4], YBCO CC의 경우에는 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 초전도 선재로 권선한 초전도 코일에서 발생하는 자화손실 예측을 위한 계산에서 BSCCO 코일에서와는 달리 YBCO CC 코일의 경우에는 코일 각 부분에서의 발생 자장에 의한 자화손실을 수직성분 자장에 의한 자화손실만으로 평가할 수 있음을 알 수 있고, YBCO CC 샘플의 수직 자화손실 측정값만으로도 다른 임의 방향의 인가자장에 의한 자화손실을 예측할 수 있음을 의미한다.

## 3. 결 론

YBCO CC 단일 및 적층선재에 대해 외부자장이 30°, 45°, 60°, 90°(수직방향)의 방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 임의방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 성분에 의한 자화손실 측정값과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다. YBCO CC 및 적층선재의 자화손실은 모든 각도에 대해 잘 일치하므로 YBCO CC 샘플의 수직 자화손실 측정값만으로도 다른 임의 방향의 인가자장에 의한 자화손실을 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문의 결과는 초전도 코일의 자화손실 평가 및 저손실 코일 설계의 기초 자료로서 사용될 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high- $T_c$  superconducting tapes in perpendicular magnetic field," *Physica C* .361, pp. 14 4-148, 2001.
- [2] Y. Fukuda, K. Toyota, K. Kajikawa, M. Iwakuma, and K. Funaki, "Field angle dependence of ac losses in stacked Bi-2223 Ag-sheathed tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 13, no. 2, pp. 3610-3613, June 2003.
- [3] 이지광 외, "BSCCO Tape 선재와 YBCO CC의 외부자장 각도에 따른 자화손실 특성비교" 전기학회논문지, 54B권 12호, pp.586-591, 2005.
- [4] 이지광 외, "BSCCO 선재의 수직방향 자장에 의한 자화손실 값을 이용한 임의방향 자장에 의한 자화손실 평가" 2005년도 대한전기학회 하계학술대회.