

BSCCO 선재의 수직방향 자장에 의한 자화순실 값을 이용한 임의방향 자장에 의한 자화순실 평가

이자광*, 박명진*, 임형우*, 차귀수*

우석대학교, *순천향대학교,

Estimation of magnetization loss at arbitrary directional magnetic field by perpendicular magnetization loss in BSCCO tapes

Ji-kwang Lee, Myungjin Park*, Hyoungwoo Lim* and Gueesoo Cha*

Woosuk University, *Soonchunhyang University

Abstract - 초전도 전력기기에서는 선재를 이용하여 권선한 코일 형태로 적용되므로 코일을 구성하는 각각의 초전도 선재에서는 코일 여자시 임의 방향의 자장이 발생한다. 초전도 코일에서 발생하는 주 교류순실인 자화순실을 예측하기 위해서는 임의 방향 외부자장에 의한 초전도 선재의 자화순실을 알아야 한다. 본 논문에서는 BSCCO 선재에서 측정된 임의방향 자장에 의한 자화순실과 수직방향 자장에 의한 자화순실값을 이용하여 초전도 선재에서 자화순실의 자장방향 의존성 및 임의 각도의 인가자장에 의한 자화순실 예측방법을 살펴보았다.

1. 서 론

120[A] 이상의 통전능력을 갖는 BSCCO 고온초전도 선재를 사용한 초전도변압기, 초전도케이블, 초전도한류기 등의 전력기기애의 적용 연구가 활발히 진행되고 있다. 배전급 이상의 대용량 초전도변압기와 같은 전력기기에 고온초전도선재를 응용하는 경우에 있어서는 요구되는 높은 전류용량을 단일선재로서는 감당 할 수 없기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 고온초전도 테이프 선재를 여러 개 적층하여 전력기기에 필요한 통전용량을 만족시키는 방법이 시도되고 있다.[1],[2]

초전도선재는 교류자장에서 사용될 경우 초전도체의 반자기적 특성으로 인해 필연적으로 히스테리시스순실이 발생하게 되며, 특히 이방성의 전기적 특성을 갖는 고온초전도체의 전류 통전능력을 키우기 위해 테이프 형태로 제작된 고온초전도선재는 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가되면 매우 큰 자화순실을 동반하게 된다. 이러한 교류순실은 냉동기의 냉각능력 및 기기 운전효율 등과 직접적으로 관계되므로, 초전도의 교류전력기기에의 응용 가능성을 판단하는 주요 요소라 할 수 있다.[3]

초전도전력기는 일반적으로 초전도선재를 권선한 코일형태로 사용되며, 코일 여자시 코일을 구성하는 각 초전도선재에는 여러 방향의 자장이 발생하고, 이러한 임의 방향의 자장은 외부 인가 자장처럼 작용하여 코일 각 부분에서 자화순실을 발생시킨다. 특히 초전도선재의 넓은 면에 수직으로 가해지는 자장이 코일 전제의 교류순실을 주도하게 되므로 이러한 수직자장에 의한 초전도선재의 자화순실을 예측하고 가능한 수직자장을 줄일 수 있는 코일구조 설계는 초전도 전력기기 설계의 중요한 고려사항이라 할 수 있다.[4],[5] 본 논문에서는 BSCCO 초전도 테이프 단일선재 및 대전류용 4적층선재에 대해 외부자장이 0°(수평방향), 30°, 45°, 60°, 90°(수직방향)의 방향으로 인가될 경우의 자화순실을 측정하였다. 측정된 자화순실 값들로부터 임의방향 인가자장에 의한 자화순실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 및 수평방향 성분에 의한 자화순실 측정값의 합과 비교하여 각도별로 두 자화순실의 차이를 살펴보았다. 이러한 측정값들을 통한 임의 방향 자장에서의 자화순실 평가는 실제의 초전도 코일에서 자화순실의 계산에 사용될 수 있으므로 초

전도 교류전력기기 설계 및 제작 코일의 손실 평가에 유용하게 사용될 수 있다.

2. BSCCO 선재의 자장방향에 대한 자화순실 특성

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

$$Q_m = \oint \vec{m} \cdot d\vec{B} = \oint \vec{B} \cdot d\vec{m} \quad (1)$$

여기서, \vec{m} 은 샘플의 자기모멘트 합이고, \vec{B} 는 외부인가자장이다.

그림 1은 자화순실 측정을 위한 회로도이다. 초전도선재의 샘플은 픽업코일 내부에 위치한다. 외부자장이 인가되는 경우에 픽업코일에 유기되는 전압은 초전도선재 샘플에서 발생하는 자장과 외부자장과의 합성에 의해 나타나므로 초전도선재의 샘플에서 발생하는 자장만을 얻기위해 픽업코일과 동일한 턴수의 캔슬코일을 픽업코일에 연결해 외부자장에 의한 유기기전력을 상쇄시킨다.

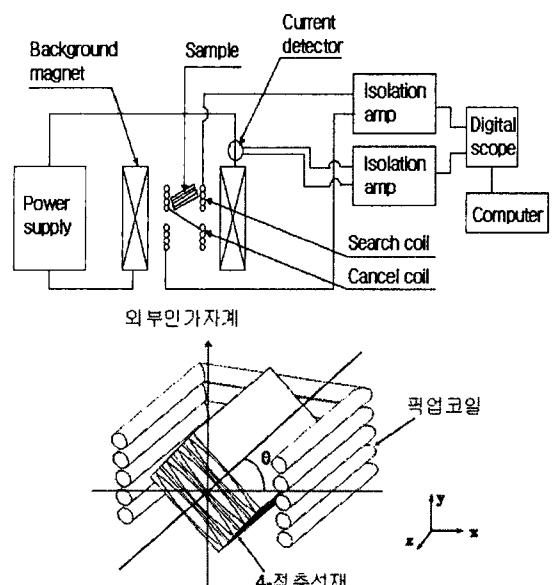


그림 1. 임의 방향 인가자장에 의한 고온초전도 테이프

선재의 자화손실 측정 회로도 및 시편 구성

측정된 전압, 전류 신호로부터 고온초전도선재의 1주기 당, 단위체적 당 자화손실은 식(2)를 이용하여 얻을 수 있다.

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

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

그림 2는 단일 테이프선재의 외부인가장의 각도에 따른 자화손실 측정값이다. 외부인가장의 범위는 교류전력기기에서 주로 나타나는 약 120mT에 대해 측정하였고, θ 는 테이프선재의 넓은 면에 대한 인가장의 방향이다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 인가장의 각도가 수직에 가까울수록, 크기가 클수록 자화손실의 증가비율이 감소함을 알 수 있다. 즉, $\theta=45^\circ$ 이상만 되어도 자화손실은 수직으로 인가된 경우에 근접하여 있음을 알 수 있으며, 이는 인가장의 수직방향 성분이 자화손실 발생을 주도하고 있다는 것을 나타낸다.

그림 3은 대전류 통전을 위해 4개의 테이프선재를 넓은 면끼리 붙인(Face-to-Face) 4적층선재(4-stacked conductor)의 외부인가 방향에 따른 자화손실 측정값이다. 그림 2의 단일선재와 비교하였을 때, 수평방향인가장의 경우를 제외하고는 전체적으로 단위체적당 손실(손실밀도)이 감소하였음을 알 수 있으며, 이는 인접한 초전도테이프의 초전도체의 반자성에 의한 자장차폐에 기인한 것으로 생각된다. 또한, 그림 2의 결과에서 적층선재에서는 인가장의 각도 증가에 따른 자화손실 증가비율이 단일선재에 비해 적음을 알 수 있는데, 이는 인가장이 수직방향에 가까울수록 자장차폐 효과가 크기 때문인 것으로 생각된다. 그림 2의 단일선재의 수직방향의 외부인가장이 인가되는 경우 약 45mT 정도에서 자화손실 폭선의 기울기가 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때는 초전도선재의 전면적을 통해 차폐전류가 흐르고 있음을 나타내며 초전도선재 내부에 자장이 완전히 침투하는 시점이기도 하다. 이 자장을 완전침투자장(full penetration field)라고 한다. 적층의 효과는 초전도체의 반자성 특성으로 이러한 완전침투자장의 크기를 증가시키는 역할을하게 된다. 적층 수가 증가할수록 이러한 현상은 두드러지게 나타난다. 차폐효과의 영향으로 적층선재의 안쪽에 위치한 선재들은 바깥쪽에 위치한 선재들보다 더욱 작은 차폐전류가 흐르고 선재내부에 전류밀도 분포가 0인 영역도 더욱 커지게 되어 상대적으로 자화손실의 크기가 감소하게 된다.

그림 2. 단일 테이프선재의 외부인가장의 각도에 따른 자화손실 측정값

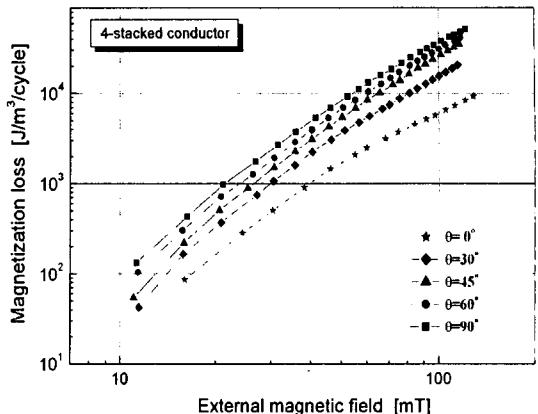


그림 3. 4적층선재의 외부인가장의 각도에 따른 자화손실 측정값

초전도 코일 여자시 코일의 각 부분에서는 선재에 대해 임의의 각도의 자장이 외부자장으로서 작용하게 되므로 코일에서 발생하는 자화손실을 시편에서 측정된 자화손실 값을 이용하여 구하기 위해서는 임의방향의 인가장에 의한 시편의 손실 측정값이 필요하게 된다. 그러나, 임의방향 자장에 의한 자화손실을 인가장의 수직, 수평방향의 자장성분에 의한 자화손실 데이터로 예측할 수 있다면, 시편에 대한 각각의 각도에서의 자화손실 측정없이 수직자장과 수평자장에 의한 자화손실만 측정하면 된다. 여기서는 단일 테이프선재 및 4적층선재에 대해 측정된 30°, 45°, 60°의 각도별 자화손실 값과 각각도별 인가장의 수직, 수평방향 자장성분 값에 대한 수직(90°) 및 수평(0°) 자화손실 합과의 크기 관계를 살펴봄으로서 임의방향 인가장에 의한 자화손실을 모의 할 수 있는지 알아본다. 임의방향 인가장의 수직($B_{ex,\perp}$), 수평($B_{ex,\parallel}$) 성분은 식(3)과 같고, 각 성분자장 값에 의한 손실 합은 식(4)와 같이 구할 수 있다.

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

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

여기서, B_{ex} 는 외부인가장, θ 는 외부인가장의 각도로서 그림 1의 표시와 같다.

식(4)에서 $Q(90^\circ, B_{ex,\perp})$ 는 시편의 $\theta=90^\circ$ 의 외부인가장에 의한 자화손실 측정값에서 외부자장이 $B_{ex,\perp}$ 일 때의 자화손실 값이고, $Q(0^\circ, B_{ex,\parallel})$ 는 시편의 $\theta=0^\circ$ 의 인가장에 의한 자화손실 측정값에서 외부자장이 $B_{ex,\parallel}$ 일 때의 자화손실 값이다.

그림 4, 그림 5는 단일 테이프선재 및 4적층선재에서 30°, 45°, 60°의 외부인가장에 의한 자화손실 측정값과 자장성분 분리 후 수직, 수평방향 외부자장에 의한 손실 측정치를 이용하여 식(4)와 같이 구한 자화손실 값의 비교이다. 결과에서 알 수 있듯이 외부인가장의 각도가 수직방향에 가까울수록 그 각도에서의 측정값과 수직, 수평 자장성분에 대한 자화손실 값으로부터 식(4)와 같이 구한 결과의 차이가 없음을 알 수 있고, 60° 이상에서는 거의 일치함을 알 수 있다.

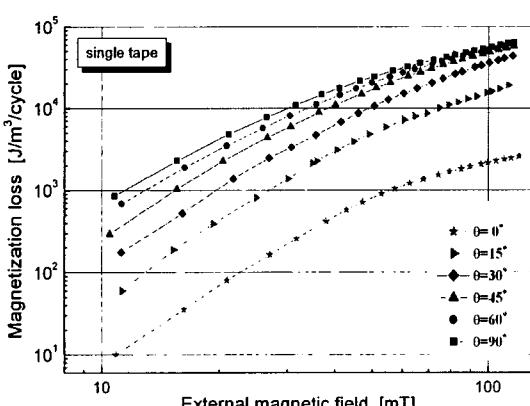


그림 6은 인가자장 10mT~120mT 범위에서 그림 4, 그림 5의 결과로부터 단일선재, 4직총선재의 30°, 45°, 60°의 외부 인가자장에 의한 자화손실 측정값과 자장성분 분리 후 수직, 수평방향 외부자장에 의한 손실 측정치를 이용해 식(5)와 같이 구한 자화손실 값의 비율의 평균치이다.

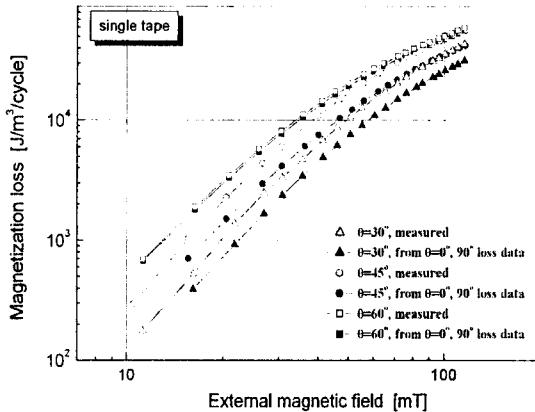


그림 4. 단일선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직, 수평성분자장에 의한 자화손실 측정 함

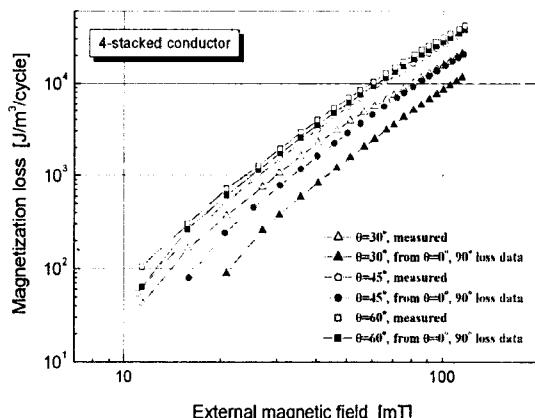


그림 5. 4직총선재의 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직, 수평성분자장에 의한 자화손실 측정 함

$$\text{loss ratio} = \frac{Q(90^\circ, B_{ex,\perp}) + Q(0^\circ, B_{ex,\parallel})}{\text{measured loss at } \theta} \quad (5)$$

그림 6의 결과에서 단일선재의 경우에는 30°, 45°에서는 측정된 자화손실에 비해 수직, 수평 자장에 의한 손실 평가치가 약 70% 정도, 60°에서는 95% 정도 인데 비해, 4직총선재에서는 인가자장의 각도가 작을수록(수평에 가까울수록) 손실 비가 감소함을 알 수 있다. 즉, 임의의 각도에서 측정된 자화손실 값과 수직, 수평 자장성분에 의한 손실 평가치가 오차가 많음을 의미하며, 이는 그림 2와 그림 3의 결과에서 알 수 있듯이 적층선재의 경우에는 수직방향 자장에 의한 자화손실 밀도는 자장차폐 효과 때문에 감소하지만, 수평방향 자장에 의한 자화손실 밀도는 인접한 선재의 반자성 때문에 선재 사이의 갭에서 자장밀도가 오히려 증가하므로 단일 선재에서 보다 손실밀도가 증가하는 현상에 기인한 것으로 생각된다.

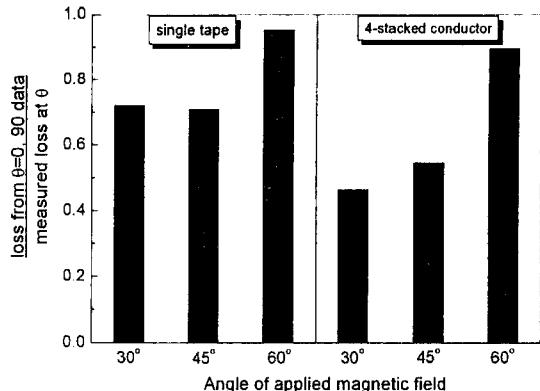


그림 6. 각도별 자화손실 측정값과 인가자장의 수직 및 수평성분자장에 의한 자화손실의 비율

3. 결 론

BSCCO 초전도 테이프 단일선재 및 대전류용 4직총선재에 대해 외부자장이 0°(수평방향), 30°, 45°, 60°, 90°(수직방향)의 방향으로 인가될 경우의 자화손실을 측정하였다. 측정된 자화손실 값들로부터 임의방향 인가자장에 의한 자화손실과 인가된 자장을 분리하여 수직방향 및 수평방향 성분에 의한 자화손실 측정값의 합과 비교하여 각도별로 두 자화손실의 차이를 살펴보았다. 외부 인가자장의 각도가 60° 이상에서는 그 각도에서의 측정값과 수직, 수평 자장 성분에 의한 자화손실 값으로부터 구한 자화손실 평가치가 일치함을 알 수 있다. 본 논문의 결과는 초전도 코일의 자화손실 평가 및 저손실 코일 설계의 기초 자료로서 사용될 수 있다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] M. Iwakuma et al., "Development of a 1T cryocooler-cooled pulse coil with a Bi2223 superconducting parallel conductor for SMES," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, v ol.9, pp. 928-931, June 1999.
- [2] M. Iwakuma et al., "Ac loss properties of a 1 MVA single-phase HTS power transformer," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 1482-1485, March 2001.
- [3] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. ten Haken, J. Rieger and M. Leghissa, "Magnetization loss in stacks of high-Tc superconducting tapes in perpendicular magnetic field," *Physica C*, 361, pp. 144-148, 2001.
- [4] T. Chiba, Q. Li, S. P. Ashworth, and M. Suenaga, "Angular dependence of ac losses at power frequencies for a stack of Bi-2223/Ag tapes," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 2143-2146, June 1999.
- [5] 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.