

Bi-2223테이프의 종자계 손실 특성

김 현준, 류 경우
전남대학교

Magnetization Loss Characteristics of Bi-2223 Tapes in Longitudinal Magnetic Field

Hyun-Jun Kim, Kyung-Woo Ryu
Chonnam National Univ.

Abstract - Bi-2223도체의 종자계 손실에 대하여 실험적으로 조사하였으며, Bi-2223도체의 종자계 손실은 주파수에는 의존하지 않으며, 이는 수직·수평방향의 자장에 대한 자화손실처럼 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다. 또한 측정된 자계 손실은 적층 본수에도 그다지 의존하지 않으며, 필라멘트들 사이가 완전히 비결합된 모델로부터 계산된 손실에 더 유사하고, 수평방향의 자장에 대한 자화손실의 약 1/5정도로 작으며, 따라서 종자계 손실은 전력기에서 그다지 중요하지 않음을 알 수 있었다.

하여 자화곡선을 측정하였다. 또한 샘플의 자화손실과는 전혀 무관한 자석으로부터 인가되는 외부자장 및 이와 동상인 자화(M)의 성분은 액체질소 중에서 상채코일을 이용하여 상채시켰으며(이를 저온상채법)[1], 모든 실험은 77 K에서 수행되었다.

1. 서 론

최근 케이블 및 변압기 등의 응용을 위하여 개발된 고온초전도테이프의 중요한 특성인 임계전류밀도특성은 상용화수준에 이르렀으나, 고온초전도 시스템의 경제성 및 효율에 크게 영향을 미치는 교류손실 문제는 여전히 과제로 남아있는 실정이다. 일반적으로 변압기시스템에서는 자화손실이 지배적인 반면, 케이블시스템에서는 통전손실이 지배적인 것으로 알려져 있다.

따라서 본 논문에서는 고온초전도테이프의 자화손실을 평가하는 자기적 방법을 이용하여 전력기에서 중요한 외부자장의 방향에 따른 자화손실특성 데이터를 도출하였으며, 전세계적으로도 2002년에 극소수의 논문이 발표된 바 있지만 특히 국내에서는 현재까지 그 특성이 전혀 알려진 바 없는 테이프 축 방향으로 인가되는 자장(이하 종자계)에 대한 손실특성에 대해서도 측정된 결과를 시스템 응용의 관점에서 분석·검토하였다.

2. 실험 샘플 및 실험 방법

2.1 실험 샘플

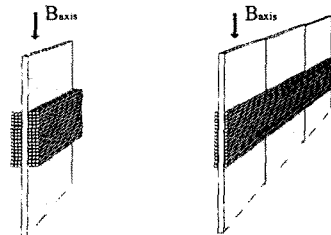
실험에 사용된 Bi-2223테이프의 사양을 표 1에, 테이프의 축 방향으로 인가되는 종자계에 의한 자화손실을 측정하기 위하여 설치한 픽업코일의 배열을 그림 1에 각각 나타내었다. 일반적으로 픽업코일의 배열 및 샘플 사이즈에 따라서 측정된 손실이 상이해지는 것으로 알려져 있지만 본 측정에서는 수평자장에 대한 자화손실 측정 실험에 근거하여 그림 1에서와 같이 픽업코일은 샘플의 중앙부에 배치하였다[1]. 또한 실험공간을 고려하여 축 방향으로의 테이프 길이는 약 6 mm가 되도록 절단하여 그림 1과 같이 준비하였으며, 이때 테이프 사이는 Kapton테이프로 절연시켰다.

2.2 실험 방법

그림 1의 샘플에 대한 자화손실 측정을 위해 사용된 실험장치를 그림 2에 나타내었다. 그림2에서 외부자장 발생용 철심자석(공극이 45 mm×175 mm×10 mm, 자석상수 10.7 mT/A)을 여자하기 위해서는 30 A, 50 V 전원을 사용하였으며, 역극성으로 접속된 픽업코일 및 상채코일 양단의 전압을 자속계(fluxmeter)로 적분

표 1 Bi-2223테이프의 사양

Bi-2223/Ag/AgMgNi	27%/43%/30%
테이프 폭×두께	3.9×0.29 mm ²
코아 폭×두께	3.7×0.26 mm ²
필라멘트 폭×두께	300×35 μm ²
필라멘트 수	37
트위스트피치	∞



a) 1본-샘플 b) 다수본-샘플

그림 1. 픽업코일의 배열.

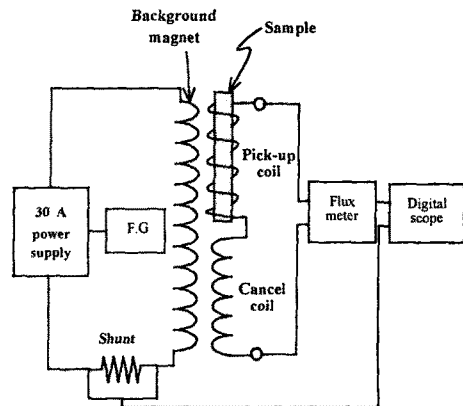


그림 2. 실험장치의 개략도.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3에는 테이프의 축 방향으로 100 mT의 자장을 인가한 상태에서 저온상쇄법에 측정된 15본 Bi-2223 도체의 자화곡선을 나타내었다.

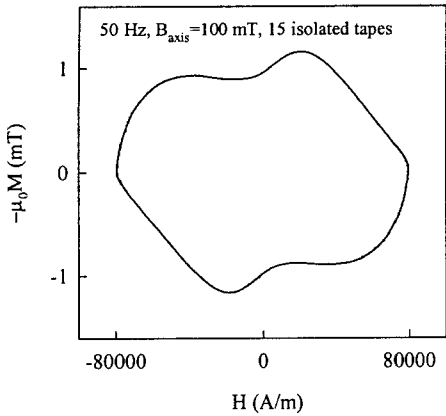
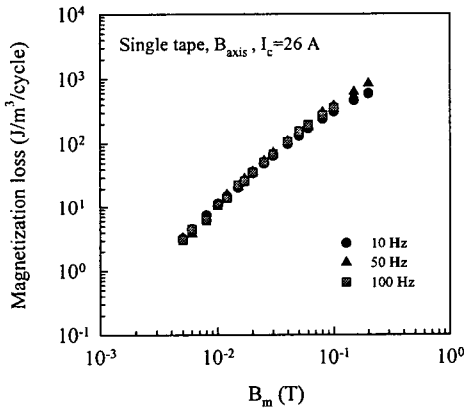
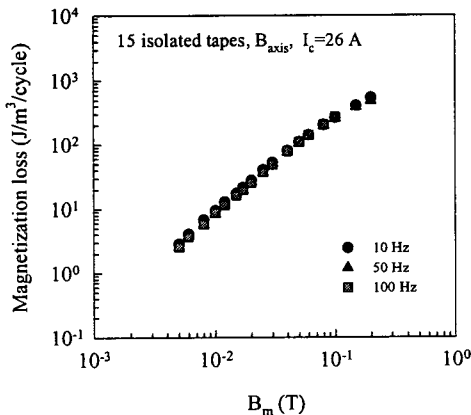


그림 3. 저온상쇄법에 의한 15본 Bi-2223도체의 자화곡선.



a) 1본 Bi-2223테이프



b) 15본 Bi-2223도체

그림 4. Bi-2223도체에서 종자계 손실의 주파수 의존성.

그림 3에서 자화자속밀도($\mu_0 M$)는 Bi-2223테이프의 코아에 대해 평균한 자속밀도를 나타낸다.

그림 4에는 1본 Bi-2223테이프 및 15본 Bi-2223도체에 전류를 흘리지 않은 상태에서 종자계를 인가할 때 측정된 자화손실 특성을 나타내었다. 그림 4에서 단위체적 당 자화손실은 코아의 단위체적을 의미하며, ●, ▲ 및 ■은 외부자장의 주파수를 10 Hz, 50 Hz 및 100 Hz로 하였을 때 측정된 자화손실을 각각 나타낸다.

그림 4로부터 1본 Bi-2223테이프 및 15본 Bi-2223도체의 종자계 손실은 외부자장의 주파수에 거의 무관함을 볼 수 있고, 이는 종자계 손실 메카니즘 또한 수직·수평방향의 자장에 대한 자화손실과 마찬가지로 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다[2]. 7본 Bi-2223도체에 대하여 동일한 실험을 행한 결과 그림 4의 결과에서 보는 바와 같이 종자계 손실은 주파수에 무관함을 확인할 수 있었다.

그림 5에는 적층 본수가 서로 상이한 Bi-2223도체에 전류를 흘리지 않은 상태에서 종자계를 인가할 때 측정된 자화손실 특성을 나타내었다. 그림 5에서 단위체적 당 자화손실은 그림 4에서와 동일하며, ▲, ■ 및 ◆은 적층 본수를 1본, 7본 및 15본으로 하였을 때 측정된 자화손실을 각각 나타낸다. 또한 그림 5의 측정된 종자계 손실을 이론적으로 검토·분석하기 위해서 무한히 넓은 평판형 초전도체(slab)의 면에 평행하게 인가한 외부자장에 의해 발생하는 초전도체의 단위체적 당 자화손실은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{2B_m^3}{3\mu_0 B_p}; B_p > B_m$$

$$Q = \frac{2B_p B_m}{\mu_0} \left(1 - \frac{2B_p}{3B_m}\right); B_p < B_m \quad (J/m^3 \cdot cycle)$$

$$B_p = \mu_0 J_c a \quad (T) \quad (1)$$

여기서 B_m 은 외부자장의 진폭을, μ_0 는 자유공간의 투자율을, B_p 는 완전침투자장을, J_c 는 임계전류밀도를, a 는 slab두께의 1/2를 각각 나타낸다. 그림 5에서 실선은 식(1)으로부터 계산된 종자계 손실을 나타내며, 손실 계산 시 slab의 두께로는 표 1의 필라멘트 두께를, 그리고 임계전류밀도로는 임계전류($I_c=26A$)를 표 1의 Bi-2223 단면적으로 나눈 것을 각각 사용하였으며, 식(1)에서 초전도체의 단위체적 당 자화손실을 코아의

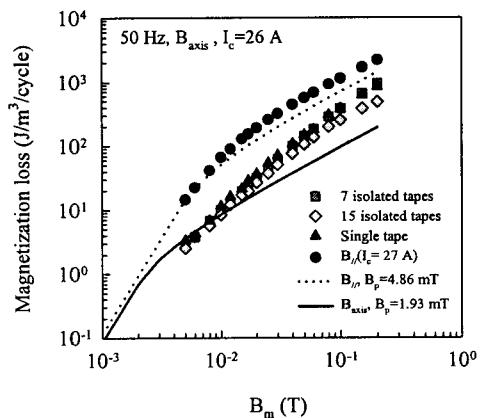


그림 5. Bi-2223도체에서 종자계 손실의 적층테이프 본수 의존성.

단위체적 당 자화손실로 변환시키기 위해서는 Bi-2223의 점적률(λ)을 곱하였으며 점적률은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \frac{\text{Bi-2223 체적}}{\text{코아 체적}} \quad (2)$$

마지막으로 테이프 면에 수평한 방향의 외부자장에 의해 발생하는 자화손실과의 비교·검토를 위하여 동일한 Bi-2223테이프($I_c = 27 \text{ A}$)에 대해 측정된 자화손실을 ●로, 계산된 자화손실은 점선으로 각각 나타내었으며, 손실 계산 시 slab의 두께로는 표 1의 코아 두께를, 임계전류밀도로는 임계전류($I_c = 27 \text{ A}$)를 표 1의 코아 단면적으로 나눈 것을 각각 사용하였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 테이프의 축 방향으로 인가되는 종자계에 대한 Bi-2223도체의 자화손실은 적층 본수가 증가함에 따라서 특히 외부자장이 큰 영역에서 다소 감소하는 것을 볼 수 있으며, 수평·수직방향의 자장에 대한 자화손실 특성과는 달리 필라멘트들 사이가 완전히 비결합(decoupled)되었다고 가정한 계산 결과에 보다 더 근접하는 것을 볼 수 있다. 물론 외부자장이 작은 영역에서는 측정된 종자계 손실과 계산된 손실이 비교적 잘 일치하는 반면 외부자장이 큰 영역에서는 이들 양자의 차가 커지는 것에 주의를 요한다. 마지막으로 Bi-2223도체의 종자계 손실은 수평방향 자장에 대한 자화손실보다 약 1/5정도로 작음을 볼 수 있고, 이는 전력기기 응용에서는 중요한 교류손실로 작용하지 않음을 의미한다.

4. 결 론

이상의 테이프 축 방향으로 인가된 종자계 대하여 측정된 Bi-2223도체의 자화손실 특성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bi-2223도체의 종자계 손실은 적층 본수에 관계없이 주파수에는 의존하지 않았으며, 이는 수직·수평 방향의 자장에 대한 자화손실처럼 히스테리시스손실이 지배적임을 의미한다.
- 2) Bi-2223도체의 종자계 손실은 적층 본수에는 그다지 의존하지 않았으며, 필라멘트들 사이가 완전히 비결합되었다고 가정한 모델로부터 계산된 손실에 더 유사하였다.
- 3) Bi-2223도체의 종자계 손실은 수평방향의 자장에 대한 자화손실의 약 1/5정도로 작으며, 이는 전력기기 응용에서 종자계 손실은 그다지 중요하지 않음을 의미한다.

본 연구는 21세기프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실 특성," 전기학회논문지, 50B권 4호, pp. 158-162, 2001.
- [2] 한형주, 김현준, 류경우, 최병주, 최세용, 나완수, "자장 방향이 Bi-2223테이프의 자화손실에 미치는 영향," 한국 초전도·저온공학회학술대회논문집, pp.271-273, 2002.