

적층 Bi-2223도체의 자화손실 특성

한형주*, 류경우*, 성기철**
*전남대학교, **한국전기연구원

Magnetization Loss Characteristic of a Stacked Bi-2223 Conductor

Hyung-Ju Han*, Kyung-Woo Ryu*, K.C. Seong**

*Chonnam National University, **Korea Electrotechnology Research Institute

iambear@kebi.com

Abstract - The ac loss is an important issue in the design of superconducting cables and transformers. In these devices the Bi-2223 tapes are usually placed face-to-face. In such arrangements ac loss is influenced by adjacent tapes. The effect is investigated by measuring the magnetization loss in the stacked conductor, which consists of various numbers of Bi-2223 tapes. For the stacked conductor in perpendicular field the magnetization loss at low fields is greatly decreased, compared to the loss of the single tape. The loss at high fields is unaffected. This behavior is well described by the slab model.

1. 서론

최근 상용화에 성공한 Bi-2223테이프는 77 K 및 자기자계에서 공학적 임계전류밀도가 약 100 A/mm²급으로 전력 케이블 및 변압기 등에 응용할 정도로 충분히 전류밀도가 높아, 프로토타입의 고온초전도 전력기에 응용되고 있다. 이와 같은 60 Hz의 고온초전도 전력기의 설계·제작에 있어서 무엇보다도 중요한 문제는 초전도체에서 발생하는 교류손실로서 그들은 공급 경로에 따라 통전전류에 의해 초전도체에 공급되는 통전손실과 외부자장으로부터 초전도체에 공급되는 자화손실로 구분할 수 있다. 지금까지 상기 두 종류의 교류손실에 대한 실험적 연구는 1본의 Bi-2223테이프에 국한되어 왔다[1]-[3].

그러나 케이블 및 변압기 시스템에서 Bi-2223테이프는 테이프 단독으로 사용되기보다는 다수본의 Bi-2223테이프를 적층한 구조(이하 적층 Bi-2223도체)로 응용되고 있다. 이와 같은 적층 Bi-2223도체에서는 인접한 테이프와의 상호작용에 의해 그 통전손실 특성이 1본 테이프의 통전손실보다 상당히 커지는 것으로 알려져 있으며[4], 자화손실 특성 또한 인접한 테

이프에 흐르는 차폐전류사이의 상호작용에 의해 1본 테이프의 자화손실 특성과 상이해지는 것으로 알려져 있다[5]. 따라서, 본 연구에서는 Bi-2223테이프의 전력 케이블 및 변압기 등의 응용에 앞서 실제 응용 상황을 고려하여 적층 Bi-2223도체에 수평·수직방향의 자장을 인가할 때 자화손실 특성 및 적층 테이프의 본수가 자화손실 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 자화손실 이론

정현파적으로 변하는 시변자장이 제2종 초전도체에 인가되면 초전도체에는 차폐전류가 흘러 반자성 특성이 나타난다. 이와 같은 시변자장에 의해 자속이 초전도체 내부에서 운동을 하게되면 비가역적인 자기적 특성 때문에 초전도체에는 히스테리시스성의 손실이 발생하게 된다. 초전도체의 자기적 특성을 설명하는데 간단하면서도 가장 널리 쓰이고 있는 이론으로서는 Bean이론을 들 수 있다. Bean이론의 주요한 개념은 초전도체 내부에 흐르는 차폐전류밀도의 크기는 반드시 0 또는 초전도체의 고유한 특성인 임계전류밀도 둘 중 하나가 되어야 한다는 것이다[6]. 그리고 초전도체의 기하학적 형상이 비교적 간단한 경우에 한해서 외부자장에 의해서 발생하는 초전도체의 자화손실은 해석적으로 계산될 수 있으며, 특히 무한히 넓은 평판형 초전도체(이하 slab)의 면에 수평방향으로 인가되는 외부자장에 의해 발생하는 단위체적당 slab의 자화손실(Q)은 식(1)(이하 slab모델)과 같이 나타낼 수 있다[3].

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

여기서 B_m 은 외부자장의 진폭을, μ_0 는 자유공간의 투자율을, B_p 는 완전침투자장을, J_c 는 임

계전류밀도를, 2a는 slab의 두께를 각각 나타낸다. 한편, 얇은 띠형 초전도체(이하 strip)의 폭에 수직하게 인가된 외부자장에 의해 발생하는 단위체적당 strip의 자화손실(Q)은 식(2)(이하 strip모델)와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$Q = \frac{2B_m^2}{\mu_0} \frac{\pi w}{2\beta d} \left(\frac{2}{\beta} \ln(\cosh \beta) - \tanh \beta \right) \quad (J/m^3 \cdot \text{cycle})$$

$$\beta = \frac{B_m}{B_{ch}}; \quad B_{ch} = \frac{\mu_0 J_c d}{\pi} \quad (T) \quad (2)$$

여기서 w 는 strip의 폭을, d 는 strip의 두께를 각각 나타내며, B_{ch} 는 특성자장(characteristic field)을, 나머지 문자에 대한 정의는 식(1)에서와 동일하다.

3. 실험 샘플 및 방법

실험에 사용된 Bi-2223테이프에 대한 사양을 표1에, 그리고 이들 테이프를 적층하여 제작한 적층 Bi-2223도체 샘플을 그림1에 각각 나타내었다. 표1에서 Bi-2223테이프의 단면에서 필라멘트들이 차지하는 영역을 코아로 정의하였으며, 그림1에서 실험 샘플을 적층할 때 테이프 사이는 두께 70 μm 인 Kapton테이프를 사용하여 전기적으로 절연시켜, 테이프사이의 전기적 결합을 완전히 차단하였다. 또한, 적층 Bi-2223도체의 자화손실 특성을 조사하기 위한 샘플의 길이는 50mm로 충분히 길게 하였으며, 픽업코일은 참고문헌[3]을 참고하여 샘플 주위에 배열하였다.

Table. 1. Specifications of Bi-2223 tapes

항 목	특 성
폭×두께	3.88×0.26~0.32 mm ²
조성	Bi-2223(25)/AgMgNi(75)
필라멘트 폭×두께	170~420×15~55 μm^2
트위스트피치	∞
필라멘트 수	37
코아 폭×두께	3.7×0.21~0.3 mm ²
임계전류(77 K)	28 A

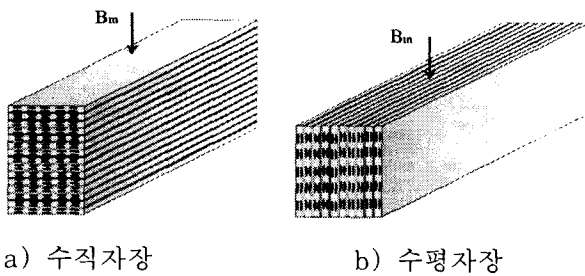


Fig. 1. Stacked Bi-2223 conductor sample.

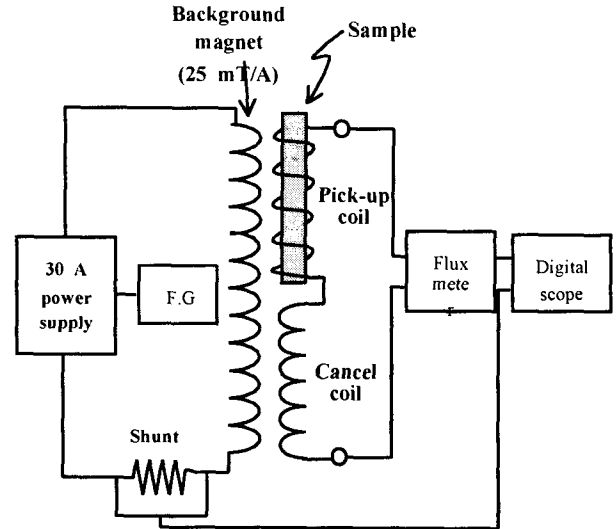


Fig. 2. Schematic of the experimental set-up.

그림1과 같이 준비된 샘플의 자화손실특성 평가를 위해 사용된 실험장치는 그림2에 나타내었다. 그림2에서 외부자장 발생용 철심자석(공극이 45 mm×175 mm×10 mm, 자석상수는 10.7 mT/A)을 여자하기 위해서는 30 A, 50 V 전원을 사용하였으며, 역극성으로 접속한 픽업코일 및 상쇄코일 양단의 전압을 자속계(fluxmeter)로 적분하여 자화곡선을 측정하였다. 또한 샘플의 자화손실과는 전혀 무관한 자장성분인 자석(M)의 성분은 액체질소 중에서 상쇄코일을 이용하여 상쇄시켰으며(저온상쇄법)[3], 모든 실험은 77 K에서 하였다.

4. 실험 결과 및 검토

그림3에는 테이프면에 평행 또는 수직인 방향으로 100 mT의 자장을 인가한 상태에서 저온상쇄법으로 측정된 15본 Bi-2223도체의 자화곡선을 나타내었다. 그림3에서 자화자속밀도($\mu_0 M$)는 Bi-2223테이프의 코아에 대한 평균 자속밀도를 나타낸다.

그림3으로부터 수직자장에 대한 자화자속밀도의 피크치는 수평자장보다 약 10배정도 큰 것을 볼 수 있고, 이와 같은 결과는 다른 연구보고에서도 잘 알려져 있다[8].

그림4에는 수평자장을 인가한 상태에서 적층 테이프의 본수에 대한 적층 Bi-2223도체의 자화손실 특성을 나타내었다. 그림4에서 ●는 1본 Bi-2223테이프, ▲는 5본 Bi-2223도체, ■는 10본 Bi-2223도체에 대하여 측정된 자화손실을 각각 나타낸다.

그림4로부터 적층 Bi-2223도체의 자화손실은 높은 자장영역에서 다소간 차이는 있지만 적층 테이프 본수에는 무관하게 1본 테이프의 자화손실 특성과 유사함을 볼 수 있으며,

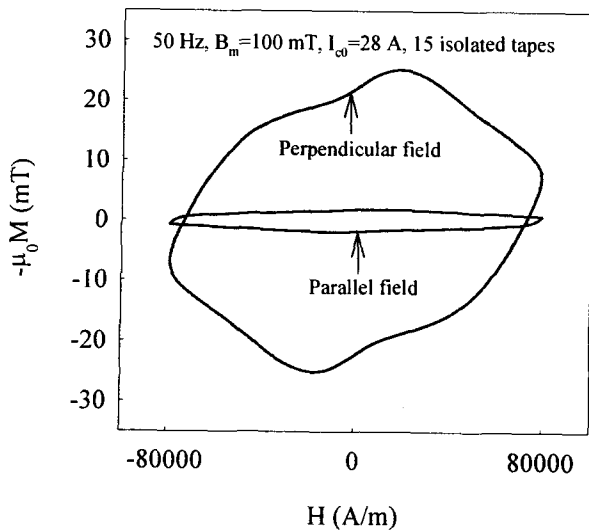


Fig. 3. Magnetization curves of the stacked Bi-2223 conductor by a cryogenic temperature cancellation at 50 Hz.

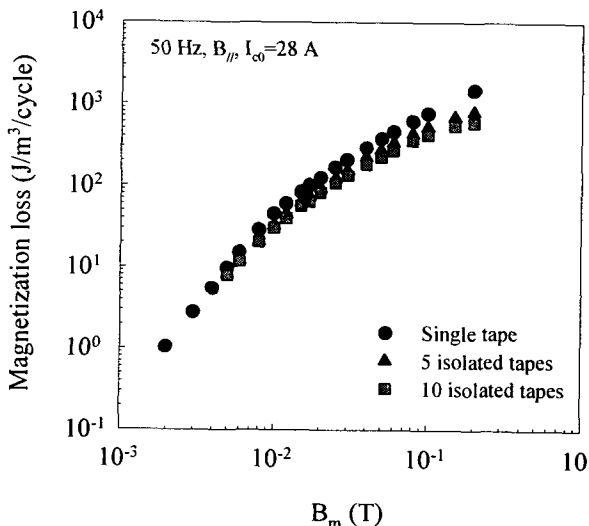


Fig. 4. Stacked tape number dependency of the magnetization losses in the stacked Bi-2223 conductor.

이는 적층 Bi-2223도체에 수평자장이 인가될 경우는 인접한 테이프에 흐르는 차폐전류의 의한 상호작용은 무시할 수 있을 정도임을 의미한다.

그림5에는 전류를 흘리지 않은 상태에서 적층 Bi-2223도체에 그림1과 같은 샘플에 수평 또는 수직 방향의 자장을 인가했을 때 자화손실 특성을 나타내었다. 그림5에서 ●는 15본 Bi-2223도체에 수직자장을, ▲는 10본 Bi-2223도체에 수평자장을 각각 인가했을 때 측정된 자화손실을 나타낸다.

또한, 측정된 자화손실을 검토하기 위해서 계산된 손실을 나타내었으며, 실선 및 1점 파선은 수직자장에 대하여 slab모델 및 strip모델로부터 계산된 자화손실을, 점선은 수평자장에 대하여 slab모델로부터 계산된 자화손실을 각각

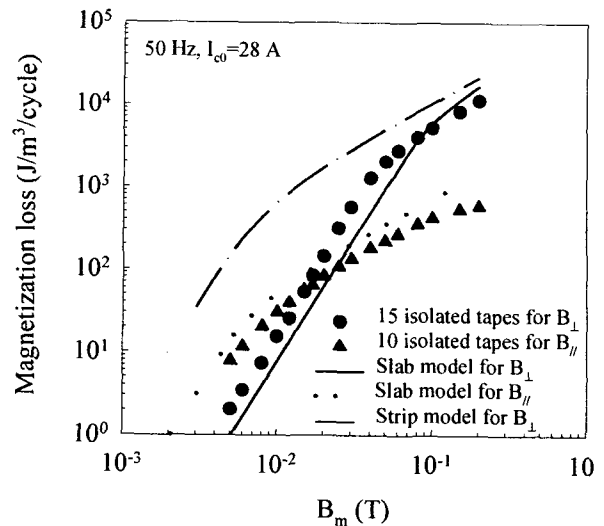


Fig. 5. Field orientation dependency of the magnetization losses in the stacked Bi-2223 conductor.

나타내었다. 그림5에서 slab모델 및 strip모델로부터 적층 Bi-2223도체의 자화손실을 계산할 때 1본 Bi-2223테이프의 코어 폭 및 두께를 각각 사용하였다.

그림5로부터 적층 Bi-2223도체의 자화손실 특성은 비교적 낮은 자장영역에서 수직자장에 대해 측정된 자화손실이 수평자장에 대한 손실보다 작은 것을 볼 수 있다[9]. 또한 수직자장의 경우 strip모델로부터 계산된 손실(1점 파선)과는 전혀 일치하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 전력 케이블 및 변압기 등과 같이 적층 Bi-2223도체 구조로 응용되는 전력기기에서 수직자장에 의해 발생하는 자화손실을 예측하기 위해서는 새로운 이론모델이 요구됨을 의미한다. 반면 수평자장에 대해 측정된 적층 Bi-2223도체의 자화손실은 slab모델로부터 계산된 손실(점선)과 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 적층 Bi-2223도체에서 수평자장에 의해 발생하는 자화손실은 테이프에 대한 slab모델을 그대로 사용해도 좋을 것을 의미한다. 수직자장에 대해 측정된 적층 Bi-2223도체의 자화손실 역시 slab모델로부터 계산된 손실과는 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 적층 Bi-2223도체의 자화손실을 예측하는 데는 자장방향에 관계없이 slab모델을 사용해도 좋을 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 Bi-2223테이프의 케이블 및 변압기 응용에 선행하여 시스템의 실제 상황을 고려하여 제작된 적층 Bi-2223도체 구조에 대한 자화손실 특성을 조사·검토하였으며, 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 적층 Bi-2223도체의 자화손실 평가기술을 확립하였다.

2) 수평 및 수직자장에 대한 적층 Bi-2223도체의 자화손실 특성은 코아에 대하여 slab모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하였다. 따라서, 케이블 및 변압기 등의 전력기기 설계·제작시 이들에서 발생하는 자화손실을 예측하는데는 수평·수직 모두 slab모델로부터 예측하여도 충분히 좋을 것을 의미한다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 박권배, 차귀수, 최경달, 이지광, 한송엽 장척 Bi-2223/AgMgNi테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권 4호, pp. 240-245, 2000.
- [2] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성," 전기학회논문지, 50B권 6호, pp. 290-294, 2001.
- [3] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실 특성," 전기학회논문지, 50B권 4호, pp. 158-162, 2001.
- [4] K. Ryu, K. B. Park and G. Cha, "Effect of the Neighboring Tape's AC Currents on Transport Current Loss of a Bi-2223 Tape," *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 2220-2223, 2001.
- [5] M. P. Oomen, J. J. Rabbers, B. T. Haken, J. Rieger, M. Leghissa, "Magnetization Loss in Stacks of High-Tc Superconducting Tapes in a Perpendicular Magnetic Field," *Physica C*, pp. 144-148, 2001.
- [6] M. P. Oomen, J. Rieger, M. Leghissa, H.H.J. ten Hate, "Magnetic AC Loss in Multi-filamentary Bi-2223/Ag tapes," *Physica C*, pp. 281-290, 1997.
- [7] K.-H. Muller, C. Andrikidis, H.K. Liu, S.X. Dou, "AC hysteresis losses in monofilamentary Pb-Bi-Sr-Ca-Cu -O/Ag tapes," *Physica C*, pp. 74-82, 1995.
- [8] Masahiro Sugimoto, Akio Kimura, Masanao Mimura Yasuzo Tanaka, Hideo Ishii, Schoichi Honjo, Yoshihiro Iwata, "Electromagnetic Interfilament Coupling of Silver-sheathed Bi-2223 Multifilamentary Tapes in Transverse AC Magnetic Fields," *Physica C*, pp. 225-232, 1997.
- [9] M. Suenaga, S.P. Ashworth, "Angular dependence of ac losses in stacked Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀/Ag tapes," *Physica C*, pp. 1178-1181, 2001.