자장 방향이 Bi-2223테이프의 자화손실에 미치는 영향

한형주*, 김현준*, 류경우*, 최병주**, 최세용***, 나완수***
*전남대학교, **서라벌대학, ***성균관대학교

The Influence of Magnetic Field Orientating on Magnetization Loss of a Bi-2223 Tape

Hyung-Ju Han*, Hyun-Jun Kim*, Kyung-Woo Ryu*,
Byung-Ju Choi**, Seyong Choi***, Wan-Soo Nah***
*Chonnam National University, **Sorabol College, ***Sung Kyun Kwan Univ.

iambear@kebi.com

Abstract - The ac loss in Bi-2223 tapes has been studied by a magnetic method. A brief overview of the theoretical background and the experimental set-up is presented. Measurements are made at 77 K in a magnetic fields. The magnitude of the ac loss indicates that filaments are fully coupled, which agrees with theory. As in other measurements, the loss in perpendicular field is larger than that in the parallel field by about a factor 10, which is close to the aspect ratio of the tape.

1. 서 론

최근 케이블 및 변압기 등의 전력기기에 응용을 위하여 개발된 액체질소온도(77 K)에서도 운전이 가능한 고온초전도테이프는 기술적으로는 상용화될 정도의 수준에 이르렀으나, 부분적으로 전력기기의 경제성 및 효율특성에 크게 영향을 미치는 교류손실에 대한 연구는 여전히 숙제로 남아있는 실정이다.

변압기와 같이 비교적 높은 외부자장 하에서 응용되는 시스템에서는 고온초전도테이프에 흐르는 전류에 의한 통전손실보다는 외부자장에 의해 발생되는 자화손실이 수십 배정도 커, 시스템의 효율뿐만 아니라 경제성에 커다란 장애를 초래하고 있다. 고온초전도테이프의 이와 같은 자화손실은 테이프의 기하학적 형상, 초전도체의 고유특성, 외부자장의 주파수 및 방향 등에 따라서 크게 영향을 받는다.

이와 같은 자화손실을 측정하여 테이프의 손실특성을 평가하는데 일반적으로 자기적 방법이 사용되며, 이의 주요 측정 메카니즘은 비가역적인 특성을 지닌 반자성체 고온초전도테이프의 자기쌍극자모멘트를 간접적으로 측정하는 방법이다. 또한, 측정결과는 센서인 픽업코일의 배열에 대단히 민감하므로 측정에 대단한 주의를 요한다.

본 논문에서는 고온초전도테이프의 자화손실을 평가할 수 있는 자기적 방법을 개발하여, 변압기시스템 응용에서 중요한 외부자장의 방향에 따른 자화손실특성을 평가하고, 그 결과를 분석·검토하였다.

2. 자화손실 이론

정현파적으로 변하는 시변자장이 제2종 초전도체에 인가되면 초전도체에는 차폐전류가 흘러 반자성특성이 나타난다. 이와 같은 시변자장에 의해 자속이 초전도체 내부에서 운동을 하게되면 비가역적인 자기적 특성 때문에 초전도체에는 히스테리시스성의 손실이 발생하게된다. 이와 같은 초전도체의 자기적 특성을 설명하는 간단하면서도 가장 널리 쓰이고 있는 이론으로서는 Bean이론을 들 수 있다. Bean이론의 주요한 개념은 초전도체 내부에 흐르는 차폐전류밀도의 크기가 반드시 0 또는 임계전류밀도 둘 중 하나로 되어야 한다는 것이다[1].

그리고 초전도체의 기하학적 형상이 비교적 간단한 경우에 한해서 외부자장에 의해서 발생되는 초전도체의 자화손실은 해석적으로 계산될 수 있으며, 특히 무한히 넓은 평판형 초전도체(이하 slab)의 면에 평행하게 인가한 외부자장에 의해 발생되는 단위체적 당 slab의 자화손실(Q)은 식(1)(이하 slab모델)과 같이 나타낼 수 있다[2].

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

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

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

여기서 B_m은 외부자장의 진폭을, μ_0는 자유공간의 투자율을, B_p는 완전침투자장을, J_c는 임계전류밀도를, 2a는 slab의 두께를 각각 나타낸다.

Table Ⅰ. Specifications of a Bi-2223 tape

항 목	특 성
폭×두께	4.1×0.21 mm^2
조성	Bi-2223(38)/Ag(40)/AgMg(22)
필라멘트 폭×두께	150~300×7~15 μm^2
트위스트피치	∞
필라멘트 수	55
코아 폭×두께	3.9×0.15 mm^2
임계전류(77 K)	130 A

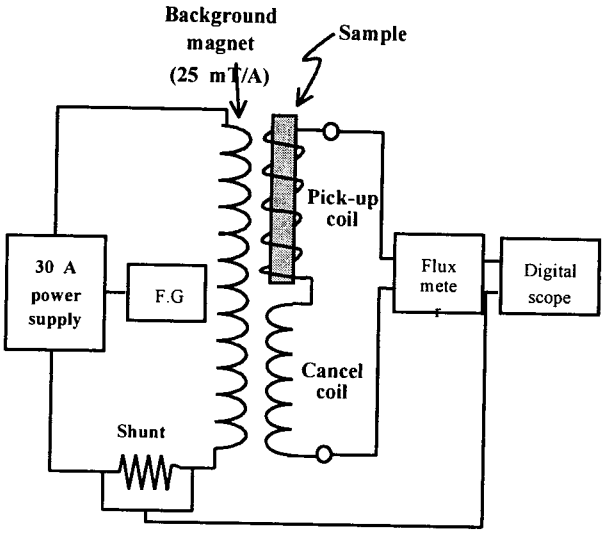

Fig. 1. Experimental set-up.

또한, 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[3].

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

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

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

3. 실험 방법

실험에 사용된 Bi-2223테이프의 사양을 표1에, 실험 장치를 그림1에 각각 나타내었다. 그림1에서 30 A, 50 V 전원(DC - 1 kHz)을 함수발생기로 제어하여 외부자장 발생을 위한 철심자석에 정현파의 전류를 인가하였으며, 자석상수는 10.7 mT/A, 공극은 45 mm×175 mm×10 mm, 자석 사이즈는 133 mm×175 mm×186 mm이다.

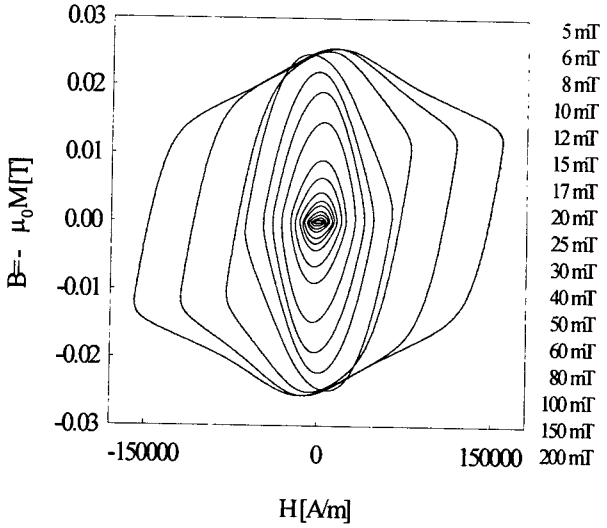

Fig. 2. Measured magnetization curves at 50 Hz.

실험 샘플은 길이 50 mm의 Bi-2223테이프에 픽업코일을 감아 제작하였다[4]. 샘플을 자석의 공극에 배치하여 자장을 인가하고, 자화곡선을 측정하는데 불필요한 외부자장은 이미 그 신뢰성이 입증된 바 있는 저온상쇄법으로 상쇄시켰다[4]. 그리고, 역극성으로 접속한 픽업코일 및 상쇄코일 양단의 전압을 자속계(또는 적분기라 함; 10 - 5000 Hz, Full scale 3 V)에 입력시킴으로서 단위체적당 자기쌍극자모멘트로 정의되는 자화(M)를 측정하여 Bi-2223테이프의 자화곡선을 최종적으로 얻었으며, 수치적분을 이용하여 자화곡선의 면적을 계산하였다.

본 연구의 모든 실험은 77K에서 하였다.

4. 실험 결과 및 검토

그림2에는 50 Hz의 수평자장에 대하여 측정된 Bi-2223테이프의 자화곡선을 나타내었다. 그림2의 결과에서 자화자속밀도는 외부자장 약 100 mT에서 포화됨을 알 수 있다.

그림3에는 전류를 흘리지 않은 상태에서 테이프 면에 평행한 방향으로 인가한 자장에 대한 1본 Bi-2223테이프의 자화손실특성을 나타내었다. 그림3에서 단위체적당 자화손실은 코아의 단위체적으로 나타내었으며, ●, ▲, ■ 및 ◆는 외부자장의 주파수를 5 Hz, 10 Hz, 50 Hz 및 100 Hz로 하였을 때 측정된 자화손실을 나타내었다. 또한 실선은 slab모델로부터 계산된 자화손실을 나타내며, 그림3에서 자화손실 계산시 slab의 두께로는 코아의 두께를 사용하였고, 계산된 완전침투자장은 약 20 mT였다.

그림3으로부터 1본 Bi-2223테이프의 자화손실은 주파수에 거의 무관하며, slab모델로부터 계산된 자화손실과도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다[5]. 이는 1본 Bi-2223테이프의 자화손실은 히스테리시스손실 메카니즘이 지배적임과 고온초전도필라멘트가 구조적으로는 분리되어

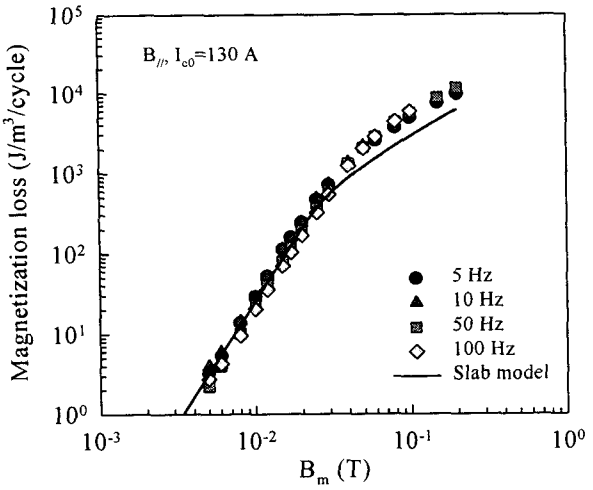

Fig. 3. Frequency dependency of the magnetization losses in the single Bi-2223 tape.

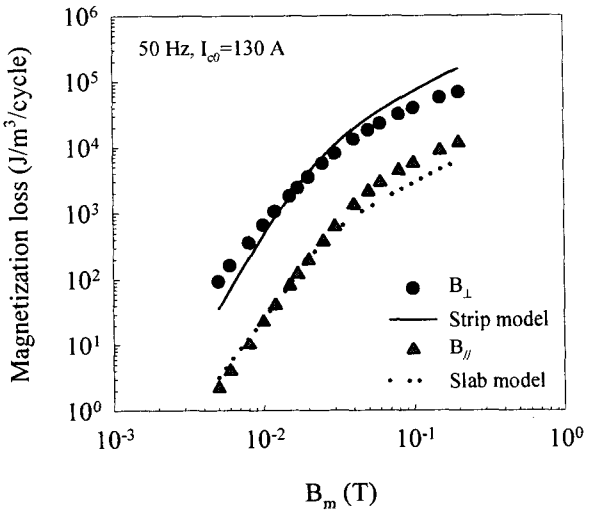

Fig. 4. Field orientation dependency of the magnetization losses in the single Bi-2223 tape.

있어도 자기적으로는 완전히 결합(fully coupled)되어있음을 의미한다.

그림4에는 외부자장의 방향에 대한 1본 Bi-2223테이프의 자화손실특성을 나타내었다. 그림4에서 ▲ 및 ●는 외부자장의 방향을 수평 및 수직으로 하였을 때 측정된 자화손실을, 실선은 수직자장에 대하여 strip모델로부터 계산된 자화손실을, 점선은 수평자장에 대하여 slab모델로부터 계산된 자화손실을 각각 나타내었다. 그림4에서 각각의 모델로부터 자화손실을 계산할 때, 코아의 폭 및 두께를 각각 사용하였다.

그림4로부터 1본 Bi-2223테이프의 자화손실 특성은 자장방향에 대단히 의존하는 것을 볼 수 있고, 전 영역에서 수직자장에 대해 측정된 자화손실은 수평자장에 대한 손실보다 약 10배 이상 큰 것을 볼 수 있다. 또한 수평자장에 대해 측정된 자화손실은 slab모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치함을 볼 수 있으며, 수직자장에 대해 측정된 자화손실은 strip모델로부터 계산된 손실과 비교적 잘 일치하는 것으로 볼 수 있다. 이는 Bi-2223테이프의 자화손실 메카니즘은 그림4의 결과에서와 마찬가지로 히스테리시스손실 메카니즘이 지배적임을 의미한다.

5. 결 론

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 수평자장에 의한 자화손실은 주파수에 무관하게 동일하였다.
2) 수직자장에 의한 자화손실은 수평자장에 의한 자화손실보다 전 영역에 걸쳐 약 10배정도 더 큼을 확인할 수 있다.
3) 수평 및 수직 자장에 의한 자화손실은 Bean모델로부터 계산된 자화손실과 비교적 잘 일치하므로, 측정된 자화손실은 히스테리시스 손실이 지배적임을 의미한다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2000-00248)지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[1] 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.
[2] Yukikazu Iwasa, Case Studies in Superconducting Magnets, New York and London, pp. 280-283, 1994.
[3] 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.
[4] 류경우, 한형주, 최병주, 나완수, 주진호, "수평자장에 대한 Bi-2223테이프의 자화손실 특성", 전기학회논문지, 50B권 4호, pp. 158-163, 2001.
[5] Naoyuki Amemiya, Kengo Miyamoto, Shun-ichi Murasawa, Hideki Mukai, Kazuya Ohmatsu, "Finite element analysis of AC loss in non-twisted Bi-2223 tape carrying AC transport current and/or exposed to DC or AC external magnetic field," *Physica C*, pp. 30-35, 1998.