

Bi-2223 테이프의 통전특성

박 권배, 김 창완, 류 경우, 이 지광*, 차 귀수**
 전남대학교, *우석대학교, **순천향대학교

Transport characteristics of a Bi-2223 tape

Kwon-Bae Park, Chang-Wan Kim, Kyung-Woo Ryu, Ji-Kang Lee*, Guee-Soo Cha**
 Chonnam National Univ., *Woosuk Univ., **Soonchunhyang Univ.

Abstract - Bi-2223 테이프의 전력기기 응용을 위해서는 임계전류이하 및 이상에서의 통전특성에 대한 이해가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 임계전류이하에서의 특성 중, 중요한 교류 통전손실을 정확히 측정할 수 있는 방법을 제안했으며, 유도전압이 측정의 정밀도에 큰 영향을 준다는 사실과, 측정된 손실은 이론식과 잘 일치하였으며, 마지막으로 통전손실은 주파수에 무관함을 알 수 있었다.

1. 서 론

1980년 중반 액체질소 온도(77 K)에서 초전도 성질을 갖는 고온 초전도체(High temperature superconductor)의 발견은 초전도체의 전력 시스템응용에 기근의 저온 초전도체를 사용함으로써 경제성 문제로 실용화하기 힘들었던 부분의 응용이 가능하게 되었다. 최근에 고온 초전도 테이프를 이용한 변압기 및 한류기의 연구가 활발히 진행 중이다. 초전도 변압기는 기존의 동 코일을 초전도선재로 교체함으로써 고효율, 소형화하는데 중요성이 있으며, 초전도한류기는 전력 계통의 사고가 발생했을 때 사고 전류를 차단 용량 이내로 제한함으로써 계통의 안정성을 주기 위한 장치이며, 사고 전류를 제한하는 방식에 따라 저항형과 유도형이 있으며, 기존의 차단장치는 제한 할 수 없는 사고전류를 초전도한류기로 교체함으로써 차단용량을 증대하는데 중요성이 있다.

본 연구는 고온초전도 선재 중에서 실용화에 가장 적합한 Bi-2223 테이프의 임계전류 이하에서 발생하는 교류 통전손실을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 샘플

본 연구에 사용된 Bi-2223 테이프의 사양과 전압탭의 배열을 표 1과 그림 1에서 각각 나타내었다. 전압탭은 직경이 0.16 mm의 동선을 사용하였으며, 전압 파형의 검출을 위해 사용된 전압탭의 종류는 그림 1과 같이 center탭, edge탭 그리고 rectangle탭으로 배열하였고, 전압탭 양단 길이는 1 m이다. Center탭은 테이프의 중앙에 납땜하여 테이프의 중심축을 따라서 배열한 것이고, edge탭은 테이프의 측면 가장자리에 납땜하고 테이프의 측면에 밀착하여 테이프와 평행하게 배열

표 1 Bi-2223 테이프의 사양

항 목	특 성
사이즈	3.5 mm × 0.3 mm
Bi-2223/Ag 비	23/77
필라멘트수	37
임계 전류	20A at 0 T, 77 K
전기 절연	무

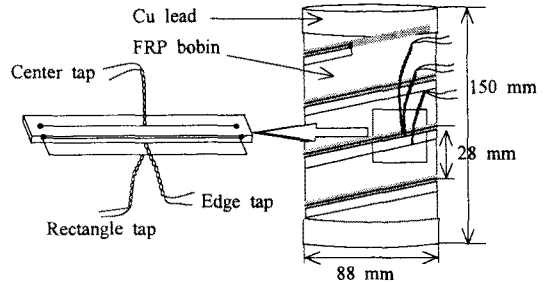


그림 1. 전압탭의 배열.

하였으며, rectangle탭은 edge탭과 동일한 위치에 납땜하고 테이프와 5.5 mm 이격시켜 테이프와 평행하게 배열하였다.

2.2. 실험 방법

전압탭의 배열이 교류 통전손실의 측정에 미치는 영향을 조사하기 위해서 그림 1과 같이 전압탭을 배열하여 각각의 손실을 측정하였으며, 전압 파형에 포함된 유도전압을 상쇄하기 위해서 상쇄코일(cancel coil)을 사용하였고, 본 연구에서는 외부 자계는 0 T, 온도는 77 K로하여 모두 측정하였다.

고온초전도 테이프의 통전손실을 측정하는 방법은 락인앰프법(Lock-in amplifier technique)과 직접법(Direct waveform integration technique)이 있다 [1]. 대부분은 락인앰프법으로 통전손실을 측정하고 있는 [2]-[3] 반면 본 연구에서는 락인앰프법으로 통전손실을 측정함과 동시에 직접법으로 통전손실을 측정하여 두 결과를 비교하였다. 직접법에서 손실 계산은 식(1)과 같이 실제 측정된 전압 파형과 전류를 직접 곱해서 한 주기에 대해 적분하는 방식이고, 락인앰프법은 FFT(fast Fourier transform)를 이용하여 전압파형으로부터 전류와 동상 성분의 기본파 전압의 진폭을 구하여 식(2)와 같이 손실을 계산하였다.

$$Q = \int_0^T v(t)i(t) dt \tag{1}$$

$$Q' = (\frac{1}{2} V_p I_p) / f \tag{2}$$

여기서 Q, Q'(J/cycle)는 각각 직접법과 락인앰프법에 의한 통전손실이며, i(t), v(t)는 각각 통전전류와 전압 양단에서 측정된 전압이며, I_p, V_p 및 f는 각각 통전전류의 진폭, 전류와 동상 성분인 전압의 진폭, 그리고 주파수이다.

3. 실험결과 및 검토

통전손실 특성

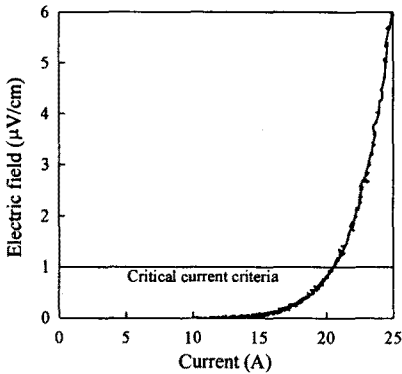


그림 2. 전계 - 직류 통전전류.

그림 2는 직류 통전전류의 증가에 따른 샘플에서 발생하는 전계를 측정된 결과이며, 임계전계 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 결정된 임계전류는 20A이고, 전압탭 배열에 무관하게 전계-직류 통전전류 관계는 동일한 결과를 보였다.

그림 3은 상쇄코일을 사용하지 않은 경우에 전압탭의 배열이 통전손실에 미치는 영향을 조사한 결과이다. 횡축은 교류 정현파 전류의 진폭을 임계전류로 정규화시킨 양이며, 종축은 1 주기동안 발생하는 손실을 샘플의 길이로 나눈 통전손실 에너지로 나타내었다. 그림 3에서 α 는 식(3)과 같다.

$$Q \propto \left(\frac{I}{I_c}\right)^\alpha \quad (3)$$

여기서 I_c 및 I 는 각각 임계전류와 통전전류의 진폭이다. 그림 3은 직접법에 의해 측정된 통전손실, 락인앰프법에 의해 측정된 손실 및 Norris 이론식에 의해서 계산된 손실을 동시에 나타내었으며, 계산에 사용된 Norris 이론식은 식(4)와 같다.

$$Q_N = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left(\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) \ln\left(1 - \frac{I}{I_c}\right) + \left(2 - \frac{I}{I_c}\right) \frac{I}{2I_c} \right) \quad (4)$$

여기서 Q_N ($J/m \cdot \text{cycle}$)은 통전손실 에너지를 나타낸

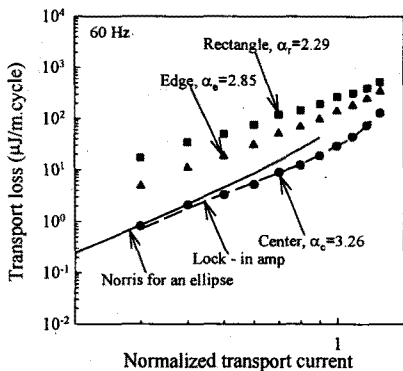


그림 3. 전압탭의 배열에 따른 통전손실 - 정규화된 교류 통전전류 관계.

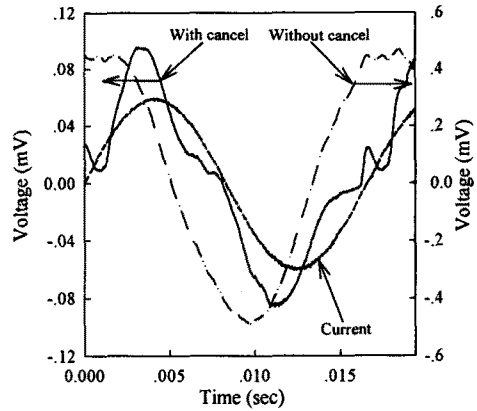
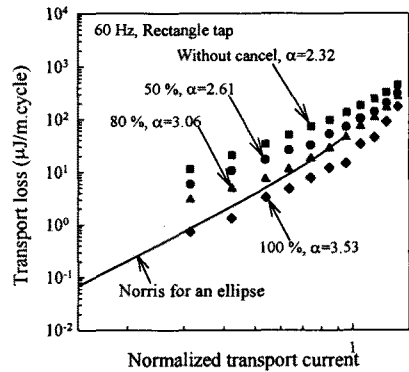
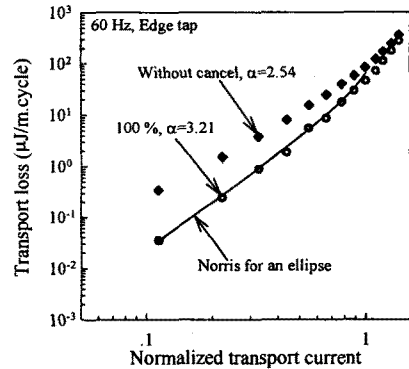


그림 4. Edge 탭의 전압 · 통전전류 파형.



a) Rectangle 탭의 경우.



b) Edge 탭의 경우.

그림 5. 유도전압의 상쇄에 따른 통전손실 - 정규화된 교류 통전전류 관계.

다. 그림 3의 결과로부터 전압탭의 배열에 따라 통전손실은 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 유도전압이 가장 큰 rectangle 탭인 경우에 가장 큰 손실 값을 보이고, 유도전압이 가장 적은 center 탭에서 Norris 이론식과 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 유도전압이 통전손실에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 알 수 있으며, 또한 직접법에 의해 측정된 결과는 락인앰프법에 의한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 edge 탭에서 진폭이 10 A 인 전류를 통전시켰을 때 상쇄코일을 사용하지 않은 경우와 상쇄코일을 사용한 경우의 전압 파형을 측정된 결과이다. 상쇄코일을 사용한 경

우 진폭은 사용하지 않은 경우보다 약 1/4배 정도로 감소하였고, 상쇄된 전압 파형에 노이즈는 다소 섞여 있지만 Bean이론에 의한 손실전압 파형과 측정된 파형이 유사한 것으로 보아 상쇄가 양호한 것으로 생각된다[3]. 이것은 그림 5의 b) 결과에서도 잘 설명이 되고 있다.

그림 5에서는 rectangle탭 및 edge탭에서 상쇄코일을 사용하여 유도전압의 상쇄 정도에 따른 통전손실을 측정된 결과이다. 그림 5의 상쇄기준은 상쇄하지 않은 전압파형을 FFT분석하여 기본파의 유도전압을 100%로 했을 때 50%의 경우는 유도전압의 반을 상쇄한 것을 의미하고 있다. 그림 5로부터 유도전압이 손실에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 상쇄정도가 가장 양호한 경우에 Norris 이론식과 거의 일치하였다. 이 결과는 다른 저자들에 의해서 보고 된 바에 따르면 전압탭의 배열이 통전손실에 상당한 영향을 준다는 결과 [2)-(3)와 달리 유도전압이 손실측정에 더 큰 영향을 주고 있다는 것을 의미하고 있다. 그리고, 손실전압에 대해서 유도전압이 상대적으로 적은 edge탭의 경우가 rectangle탭의 경우보다 양호한 정확도를 보여주고 있다. 그러므로 통전손실 측정에서 전압탭의 배열시 유도전압이 적도록 전압탭을 배열하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. 그림 6에서 종축의 정규화시킨 손실전압은 그림 5의 결과에 대해 FFT 분석에 의한 유도전압을 Norris이론식의 손실전압으로 정규화시킨 양이다. 그림 5의 b)에서 100% 상쇄한 경우는 정규화 된 손실전압이 최소 2.0으로 측정된 손실과 Norris 이론식에 의한 계산 값이 잘 일치하는 반면 상쇄시키지 않은 경우는 정규화 된 손실전압이 최대 약 0.5이하로 대단히 작으며 그림 5의 b)로부터 측정된 손실은 Norris 이론치와 상이함을 알 수 있다. 따라서 통전손실의 정확도를 향상을 위해서는 정규화 된 손실전압이 크면 클수록 향상됨을 알 수 있다.

그림 7은 center탭의 경우에 각각 상이한 주파수에 대한 통전손실을 측정된 결과이다. 이 결과로부터 통전손실은 주파수에 무관한 것을 알 수가 있다.

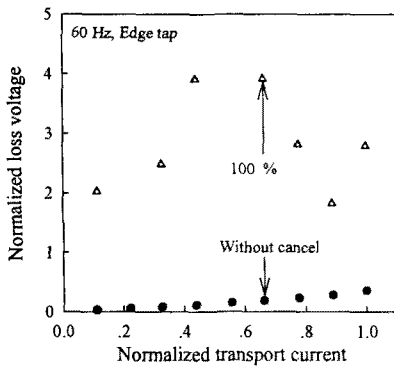


그림 6. 정규화된 손실전압 - 정규화된 교류 통전전류 관계.

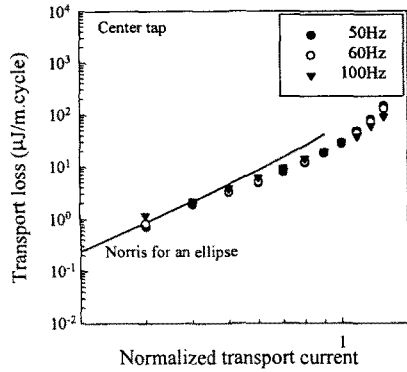


그림 7. 주파수에 따른 통전손실 - 정규화된 교류 통전전류 관계.

3. 결 론

Bi-2223 테이프의 교류 통전손실에 대한 결과를 요약하면, 정확한 통전손실의 측정은 전압탭의 배열이 미치는 영향보다 전압파형에 포함된 유도전압이 손실측정에 미치는 영향이 더 큼을 알 수가 있었다.

통전손실 측정은 손실전압에 포함된 유도전압을 양호하게 상쇄되었을 때 Norris 이론식의 결과와 일치하였으며, 정규화된 손실전압이 크면 클수록 손실측정의 정확도가 향상되었다.

측정된 전압파형 중에 손실전압이 유도전압에 비해서 절대적으로 적은 rectangle 탭의 경우에 유도전압을 상쇄하더라도 손실측정에 정확도가 떨어지는 반면, 유도전압이 상대적으로 적은 edge 탭의 경우에 손실측정에 양호한 정확도를 나타내었다. 그러므로, rectangle 탭의 배열보다는 edge 탭이나 center 탭이 타당하지만 상쇄코일을 사용하지 않는다면 center 탭으로 손실을 측정하는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

전계-직류 통전전류의 관계는 전압탭의 배열에 무관하게 동일한 결과를 보였으며, Bi-2223의 통전손실은 주파수에 의존성이 없는 결과를 보였다.

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었다.

(참 고 문 헌)

- [1] N. Amemiya, K. Miyamoto, S. Murasawa, H. Mukai, and K. 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," submitted to Physica C, August 25, 1998.
- [2] S. Fleshler, L.T. Cronis, G.E. Conway, and A.P. Malozemoff "Measurement of ac power loss of (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x composite tapes using the transport technique," Appl. Phys. Lett. 67(21), pp 3189-3191, November 20, 1995.
- [3] M.Ciszek, A.M. Campbell, and B.A. Glowacki, "The effect of potential contact position on AC loss measurements in superconducting BSCCO tape," Physica C 233, pp 203-208, August 9, 1994.