

필라멘트트위스트피치가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향

정 재훈, 류 경우, 최 병주*, 장 석현**, 주 진호**
 전남대학교, *서라벌대학, **성균관대학교

The Influence of a Filament Twist Pitch on Transport Losses in a Bi-2223 Tape

Jae-Hoon Jung, Kyung-Woo Ryu, Byung-Ju Choi*, Seok-Hern Jang**, Jin-ho Joo**
 Chonnam National Univ., *Sorabol college, **Sungkyunkwan Univ.

Abstract - 필라멘트의 트위스트피치가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사하였으며, 그 주요 결과는 Bi-2223테이프의 자기자계손실은 필라멘트의 트위스트피치에 의해서는 그다지 영향을 받지 않는 반면 외부교류자장 하에서 Bi-2223테이프에 발생하는 통전손실은 트위스트피치에 영향을 비교적 크게 받으며, 필라멘트의 트위스트피치가 작을수록 통전손실도 작아진다.

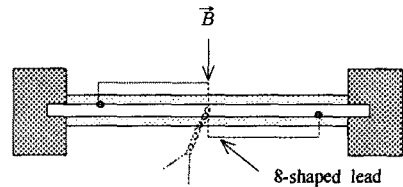


그림 1. 전압리드의 배열 및 샘플.

1. 서 론

최근 임계전류특성이 우수한 Bi-2223테이프의 장산화 성공함에 따라 이들의 전력분야 응용이 가시화 되고있는 실정이지만, 이들 시스템의 효율 및 경제성에 큰 영향을 미치는 교류손실에 대한 연구는 고온초전도 전력기기의 상용화에 있어서 여전히 중요한 과제이다.

Bi-2223테이프의 교류손실은 통전손실과 자화손실로 분류되며, 시스템에 따라서 통전손실이 지배적으로 또는 자화손실이 지배적으로 되기도 한다. 특히 통전손실에 영향을 미치는 중요한 인자로서는 테이프의 필라멘트의 트위스트피치 및 중형비 등과 같은 내적 인자와 외부자장, 주파수 등과 같은 외적 인자로 나눌 수 있다.

따라서 본 논문에서는 측정 시, 외부자장에 의한 오차를 가장 작게 유발시키는 8자형 전압리드를 이용하여, 통전손실의 중요한 내적 인자 중 하나인 필라멘트트위스트피치가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대하여 실험적으로 조사·분석을 하였다.

2. 실험 샘플 및 실험 방법

2.1 실험 샘플

통전손실 측정에 사용된 Bi-2223테이프의 주요 사양을 표 1에 나타낸다. 또한 통전손실 평가 시, 전압리드로서는 외부자장 및 자화($\mu_0 M$)에 유도되는 전압이 자체적으로 상쇄되는 특징을 지닌 8자형 전압리드를 사용하였으며[1], 8자형 전압리드가 부착된 실험샘플을 그림 1에 나타낸다.

표 1 Bi-2223테이프의 사양

항 목	특 성
Bi-2223/Barrier/Ag	31 %/0 %/69 %
테이프의 폭×두께	3.1 mm×0.25 mm
코아의 폭×두께	3.0 mm×0.21 mm
필라멘트의 폭×두께	380~410 μ m×22~27 μ m
필라멘트수	37
트위스트피치	∞ , 60mm, 24mm, 12mm
임계전류(0 T, 77 K)	15 A, 13 A, 14 A, 13 A

2.2 실험 방법

그림 2에는 외부자장이 인가된 상태에서 Bi-2223테이프의 통전손실을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 그림 2에서 외부자장을 발생시키기 위해서 30 A, 50 V전원(DC - 1 kHz)을 2채널 함수발생기로 제어하여 철심형 자석에 정현파의 교류 전류를 인가하였으며, 자석상수는 10.7 mT/A이고 공극은 45 mm × 175 mm × 10 mm이다. 또한 Bi-2223테이프를 통전시키기 위해서 300 A, 20 V전원(DC - 1 kHz)을 동일한 함수발생기로 제어하여 정현파의 교류 전류를 인가하였으며, 자석 및 샘플에 흐르는 전류를 측정하기 위해서는 션트를 사용했다. 션트 및 그림 1의 샘플에 장착된 전압리드로부터 나오는 신호는 절연앰프를 통해 스코프에서 기록하였다.

Bi-2223테이프의 통전손실을 측정하는데 널리 이용되고 있는 전기적 방법에는 직접법과 락인앰프법이 있는데[1], 본 연구에서는 직접법을 이용하여 통전손실을 측정하였으며, 테이프 단위길이 및 1 주기에 대한 통전손실(Q)은 식(1)으로 나타낼 수 있다.

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

여기서 T 는 정현파 전류의 주기를, $i(t)$ 는 테이프의 전류를, $v(t)$ 및 l 은 전압리드의 납땀부사이의 전압 및 길이를 각각 나타낸다. 또한 모든 실험은 액체질소 중 즉 77 K에서 하였으며, 전압신호는 증폭기를 통해 디지털 스코프에 기록하였다.

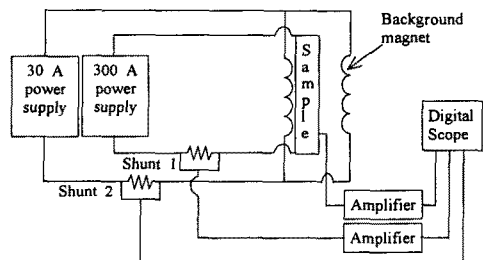
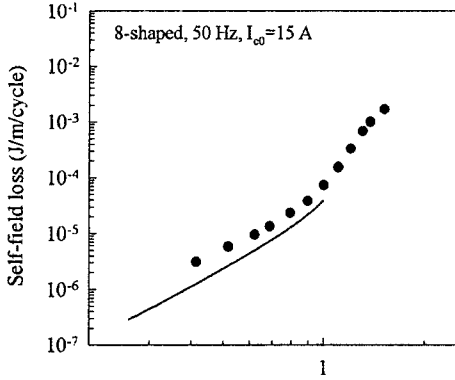


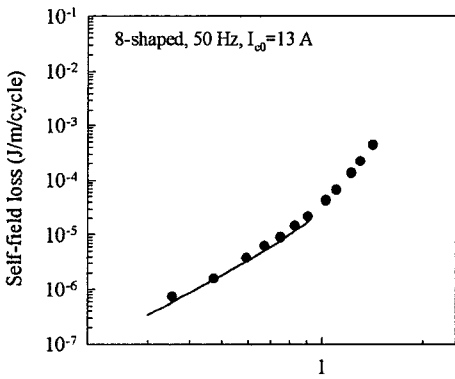
그림 2. 실험장치의 개략도.

3. 실험 결과 및 고찰

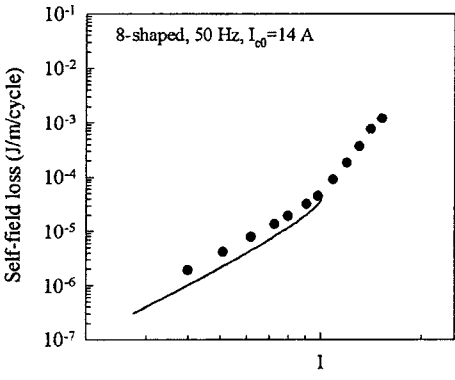
그림 3에는 필라멘트의 트위스트피치가 상이한 Bi-2223테이프에 외부자장을 인가하지 않은 상태에서 교류전류만을 흘렸을 때 테이프에서 발생되는 측정된 자기자계손실을 각각 나타낸다.



a) 트위스트피치=60 mm



b) 트위스트피치=12 mm



c) 트위스트피치=24 mm

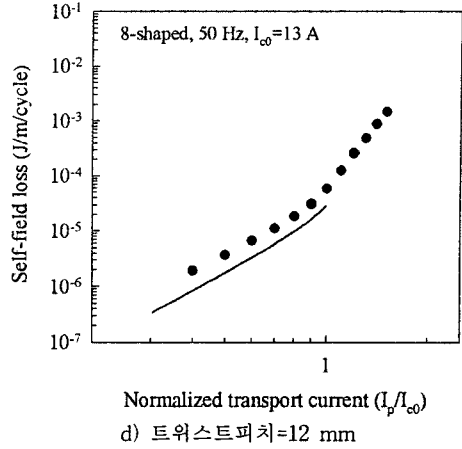


그림 3. 자기자계손실 - 정규화된 통전전류 관계.

또한 코아의 형상이 타원형 단면을 갖는 Bi-2223테이프의 단위길이 및 1 주기 당 자기자계손실(Q_{self})은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

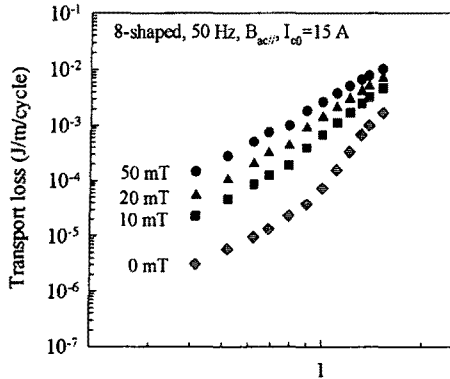
$$Q_{self} = \frac{\mu_0 I_{co}^2}{\pi} \left(\left(1 - \frac{I_p}{I_{co}}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_{co}}\right) + \frac{(2 - I_p/I_{co})I_p}{2I_{co}} \right) \quad (2)$$

여기서 μ_0 은 진공중의 투자율을, I_{co} 는 자기자장에서 테이프의 임계전류, I_p 는 정현파 교류전류의 피크치를 각각 나타낸다. 그림 3에서 실선은 식(2)으로부터 계산된 Bi-2223테이프의 자기자계손실을 나타낸다.

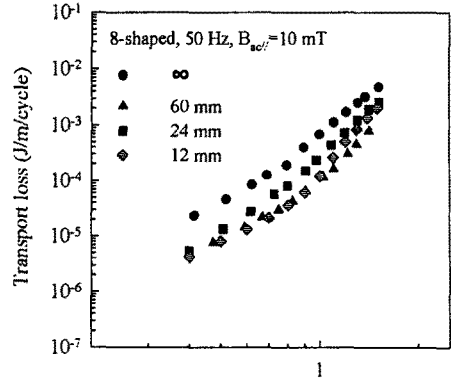
그림 3에서 보는 바와 같이 트위스트피치가 60 mm인 경우를 제외하고는 Bi-2223테이프의 측정된 자기자계손실이 식(2)으로부터 계산된 손실보다 큰 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 현재 상용화된 Bi-2223테이프(필라멘트트위스트피치= ∞)에서 일반적으로 볼 수 있는 측정된 자기자계손실과 식(2)으로부터 계산된 손실이 비교적 잘 일치하는 경향과 매우 상이한 결과이다. 이는 필라멘트의 트위스트피치에 의한 영향이라기보다는 Bi-2223테이프의 제조 시 발생할 수 있는 코아의 형상의 상이함 때문으로 사료된다. 왜냐하면 필라멘트를 트위스트함으로서 필라멘트간의 결합이 끊어(decoupled)졌다고 가정하면 필라멘트의 트위스트피치가 짧아질수록 자기자계손실이 작아져야하지만 그림 3의 결과에서 보는 바와 같이 트위스트피치가 ∞ 에서 60 mm로 감소함에 따라서 자기자계손실이 현격히 감소하는 경향이 보이다가 24 mm 및 12 mm로 더욱 짧아지면 자기자계손실은 반대로 커지는 것을 볼 수 있다.

그림 4에는 필라멘트의 트위스트피치가 가장 긴 ∞ 인 그리고 가장 짧은 12 mm인 Bi-2223테이프에 수평방향의 외부자장을 인가했을 때 측정된 통전손실을 나타낸다.

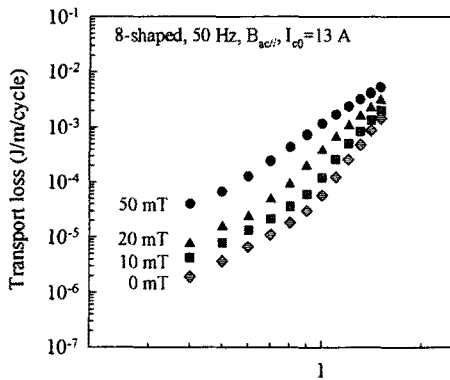
그림 4에서 보는 바와 같이 측정된 Bi-2223테이프의 통전손실 특성은 필라멘트의 트위스트피치에 관계없이 현재 상용화된 Bi-2223테이프(필라멘트트위스트피치= ∞)에서 일반적으로 볼 수 있는 즉 외부교류자장이 커짐에 따라서 통전손실도 증가하는 것을 볼 수 있다[1]. 그러나 트위스트피치가 ∞ 인 경우는 10 mT 즉 낮은 외부자장 영역에서 통전손실이 급격히 증가하는 반면 트위스트피치가 12 mm인 경우는 비교적 완만히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 필라멘트의 트위스트가 자기자계손실에는 영향을 주지 못하는 반면 외부교류자장 하에서 발생하는 통전손실에는 분명히 영향을 미치고 있음을 의미한다.



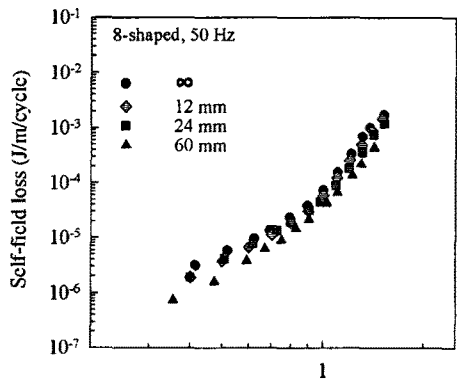
a) 트위스트피치 = ∞



a) 통전손실



b) 트위스트피치 = 12 mm



b) 자기자계손실

그림 4. 통전손실 - 정규화된 통전전류 관계: 외부자장의 영향.

그림 5의 a)에는 Bi-2223테이프에 10 mT의 외부교류자장을 인가한 경우 트위스트피치가 통전손실에 미치는 영향에 대해 조사한 결과를, 그리고 b)에는 a)의 실험 결과와의 비교·검토를 위해 동일한 트위스트피치에 대한 자기자계손실을 각각 나타낸다.

그림 5에서 보는 바와 같이 b)의 결과로부터 자기자계손실은 비교적 필라멘트의 트위스트피치에 영향을 받지 않는 반면 트위스트피치가 작아질수록 외부교류자장 하에서 발생하는 통전손실이 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이러한 실험결과를 뒷받침하는 이론적 해석 결과도 타 연구결과에서 볼 수 있다[2]. 물론 그림 b)의 결과에서 보는 바와 같이 트위스트피치가 ∞ , 24 mm, 12 mm로 상이함에도 불구하고 자기자계손실은 거의 동일한 반면 트위스트피치가 60 mm인 경우만 유난히 자기자계손실이 다른 테이프와 비교하여 작은 것을 볼 수 있다. 이것이 그림 a)에서 60 mm 트위스트피치는 12 mm 및 24 mm보다 크에도 불구하고 통전손실이 작아지는 원인으로 사료된다.

그림 5. 통전손실 및 자기자계손실 - 정규화된 통전전류 관계: 트위스트피치의 영향.

4. 결 론

필라멘트의 트위스트피치가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Bi-2223테이프의 자기자계손실은 필라멘트의 트위스트피치에 의해서는 그다지 영향을 받지 않는다.
- 2) 그러나 외부교류자장 하에서 Bi-2223테이프에 발생하는 통전손실은 트위스트피치에 영향을 받으며, 필라멘트의 트위스트피치가 작을수록 통전손실도 작아진다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: 2000-2-30200-002-3)지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부 교류자장에 대한 Bi-2223 테이프의 통전손실 특성," 전기학회논문지, 50B권 6호, pp.290-294, 2001.
- [2] N. Banno and N. Amemiya, "Numerical Analysis of AC Loss in High Tc Twisted Tape Carrying AC Transport Current in External AC Magnetic Field: Effect of Twisting on Loss Reduction," Palm Dessert, CA, 1998.