

외부자계가 고온 초전도테이프의 통전손실에 미치는 영향

김 창완, 박 권배, 한 형주, 류 경우.  
전남대학교

The Influence of External Magnetic Field on Transport Loss in a HTS tape

Chang-Wan Kim, Kwon-Bae Park, Hyung-Ju Han, Kyung-Woo Ryu  
Chonnam National Univ.

**Abstract** - Bi-2223테이프의 실제 전력기기 응용측면을 고려할 때 테이프는 외부자계에 놓이게 된다. 따라서 본 연구에서는 외부자계가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 비교적 작은 자계가 인가된 경우는 전압리드의 배열이 통전손실측정에 큰 영향을 미쳤으나 비교적 큰 자계가 인가된 경우는 전압리드의 배열에 무관하다는 사실과, 전계와 통전손실은 외부자계가 증가함에 따라 각각 증가하였으며 비교적 큰 자계가 인가된 경우에 통전손실은 동저항 손실이 지배적이었으며, 외부자계가 작은 영역에서 통전손실은 동저항 이외의 또 다른 메카니즘에 의한 것으로 사려된다.

표 1 Bi-2223테이프의 사양

항 목	특 성
사이즈	3.5 mm×0.3 mm
Bi-2223/AgMgNi	25/75
필라멘트수	37
트위스트 유·무	무

1. 서 론

1980년대 중반 고온 초전도체의 발견 이후 초전도체의 응용을 위한 연구가 활발히 진행되어지고 있는데 최근 장치 선재화에 성공한 Bi-2223테이프를 이용한 전력기기 응용을 위한 연구가 진행중이다. 예를들면, 전력수요가 증가하는 도심지역에서 적용하기에 가장 이상적이며 송전 에너지밀도가 매우 높고 송전에너지 손실이 현저하게 적은 초전도 전력케이블과 동손이 없어 일반 변압기보다 효율이 높고 무게와 부피가 감소된 초전도 변압기등이 있다. 이러한 전력기기를 설계하기에 앞서 경제성과 실용화 가능성에 중요한 요소인 기기의 효율을 고려하여야 하며 효율에 중요한 영향을 미치는 초전도테이프의 교류손실을 이해하는 것이 무엇보다도 선행되어야 할 과제이다.

통전손실에 영향을 미치는 인자는 테이프의 종횡비, 필라멘트 트위스트의 유·무등과 같은 내적요인과 전압리드의 배열 및 외부자계등과 같은 외적인자로 구분되어지며 특히 외적인자가 교류손실에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져있다[1-2]. 따라서 본 연구에서는 초전도테이프의 전력기기의 응용적인 측면을 고려하여 외부자계가 테이프의 통전손실에 미치는 영향과 외부자계가 인가된 경우 전압리드의 배열이 통전손실측정에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 샘플 및 실험 방법

2.1 실험 샘플

그림 1은 외부자계가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향을 조사하기 위한 샘플이다. 또한 그림 1과 같이 전압리드의 배열이 통전손실에 미치는 영향을 조사하기 위해서 3종류의 전압리드를 장착하였다. 전압리드 간 길이는 0.1 m로 하였다. 먼저 두 종류의 전압리드의 접촉위치는 테이프 가장자리 선상의 동일한 위치에 뿔납한 후, 하나는 가장자리선을 따라 배열하였고(이하 edge 리드) 다른 하나는 가장자리 선으로부터 5.3 mm 떨어진 사각루프 배열로 하였다(이하 rectangle 리드). 다른 한 종류는 테이프의 양쪽 가장자리에 뿔납한후 8자 형태로 배열하였다(이하 8자형 리드). 또한 외부자계에 의

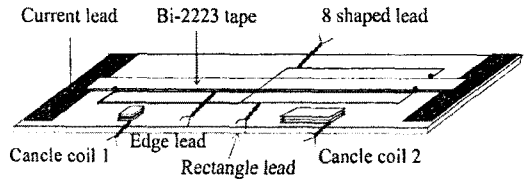


그림 1. 전압리드의 배열 및 상쇄코일.

해 edge 리드에서 발생된 유도성 전압을 상쇄하기 위해 cancel coil 1을 장착하였으며, rectangle 리드에서 발생된 유도성 전압을 상쇄하기 위해 cancel coil 2를 장착하였다.

2.2 실험 방법

그림 2는 Bi-2223테이프 면에 수직한 자계가 인가된 경우에 통전손실을 측정하기 위한 실험장치이다. 50 V, 30 A 전원과 20 V, 300 A 전원을 2 채널 함수발생기로 제어하여 직류 및 정현파의 교류 통전전류를 각각 자석과 샘플에 인가하였으며 자석과 샘플에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 셉트를 사용하였고 셉트 및 실험샘플의 전압리드로부터 나오는 신호는 절연앰프를 통해 디지털스코프에서 기록하였다. 이때 샘플 리드전압 중에서 외부자계에 의해서 발생하는 유도성 전압은 상쇄코일을 이용하여 소거하였다.

고온 초전도테이프의 통전손실을 측정하는 방법에는

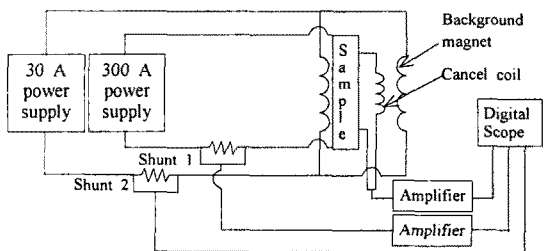


그림 2. 실험장치의 개략도.

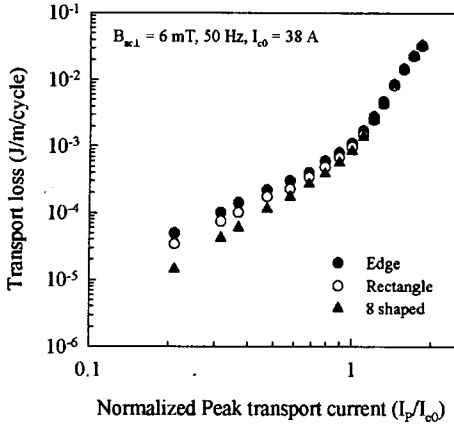


그림 3. 통전손실-정규화된 통전전류 관계 : 전압리드의 영향.

직접법(direct wave integration method)과 락인앰프법(Lock-in amplifier method)이 있는데[3], 본 연구에서는 직접법을 이용하여 손실을 계산하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

그림 3 및 4는 테이프의 면에 수직인 외부 교류자계가 인가된 경우에 전압 리드의 배열이 통전손실에 미치는 영향을 조사한 결과이다. 그림 3은 외부 교류자계 중 비교적 크기가 작은 6 mT가 인가되었을 때의 결과이며 그림 4는 비교적 크기가 큰 70 mT가 인가되었을 때의 결과이다. 그림 3의 결과로부터 알 수 있듯이 rectangle리드와 edge리드에 의한 손실 측정 결과는 비교적 잘 일치하였으나 8자형리드의 경우는 임계전류 이하에서 다른 두 종류의 리드와 매우 상이한 결과를 보였다. 그러므로 작은 외부 교류자계가 인가된 경우에 통전손실은 전압리드의 배열에 대단히 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 반면 그림 4의 결과로부터 알 수 있듯이 비교적 외부 교류자계가 큰 경우에는 상이한 전압리드의 배열에서도 통전손실이 잘 일치하는 결과를 보였다. 그림 3 및 4의 결과는 비교적 작은 자계가 인가된 경우에 통전손실은 전압리드의 배열에 영향을 받는 반면에 비교적 큰 자계가 인가된 경우에 통전손실은 전압리

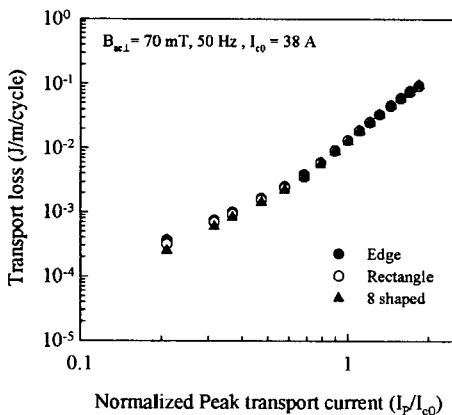


그림 4. 통전손실-정규화된 통전전류 관계 : 전압리드의 영향.

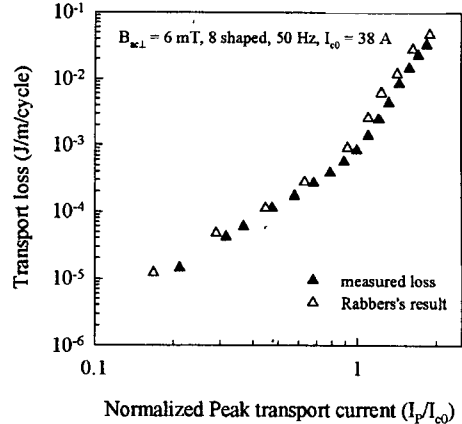


그림 5. 통전손실의 비교 : 8자형리드.

드의 배열과 무관하다는 것을 알 수 있었다. 이때 edge 리드는 일반적으로 손실 측정에 사용되어지는 rectangle 리드에 의해 측정된 손실 값과 비교적 잘 일치하였고 또한 외부 교류자계에 의해서 발생된 유도성 전압이 작기 때문에 이하의 실험에서는 edge리드를 사용하여 통전손실을 측정하였다.

그림 5는 본 연구의 손실 측정 값에 대한 신뢰성 검증 위해 8자형리드 배열이 사용된 다른 연구 논문의 실험 결과와 비교하였다[4]. 이 때 외부자계는 6 mT가 인가되었다. 그림 5의 결과로부터 본 연구에서 8자형리드 배열을 사용한 손실 측정 결과는 Rabbers의 측정 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 본 연구에서 사용된 8자형리드의 측정 결과에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

그림 6은 외부 자계가 인가된 경우 직류 전압·전류 관계를 측정 한 결과이다. 그림 6의 결과로부터 알 수 있듯이 외부 교류자계가 증가함에 따라서 전계가 급격하게 증가한 반면에 50 mT의 직류자계가 인가된 경우는 직류 전압·전류관계 곡선의 형태는 변하지 않고 직류 전압·전류관계 곡선은 왼쪽으로 이동한 결과를 보였다. 이것은 외부 교류자계가 인가되었을 때 임계전류의 감소에 의한 전압의 증가만을 보이는 것으로 사려된다. 외부 교류자계가 10 mT 이상 인가된 경우에 기울기가 1.0에 근접하였다. 이것은 외부 교류자계가 인가되는 경우에는 일종의 저항성 전압과 유사함을 의미하고 있다.

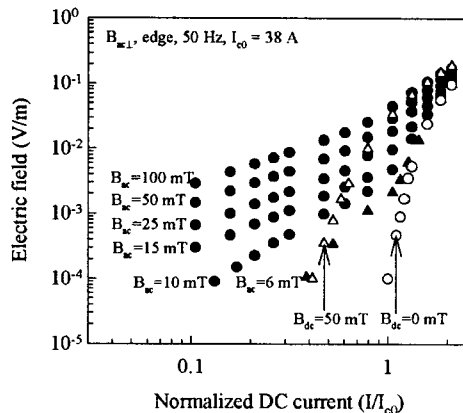


그림 6. 전계 - 정규화된 직류전류 관계.

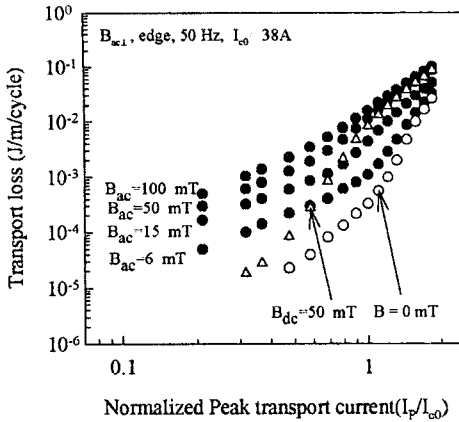


그림 7. 통전손실 - 정규화된 통전전류 관계.

그림 7은 외부 자계가 인가된 경우 통전손실을 측정 한 결과이다. 그림 7의 결과로부터 외부 교류자계가 인가 되었을 때 통전손실이 급격하게 증가하였다. 또한 외부 직류자계 50 mT가 인가되었을 때 보다 외부 교류자계 50 mT가 통전손실에 훨씬 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 외부 직류자계에 의한 손실증가 원인은 임계전류의 감소로 생각된다. 그림 7에서 외부 교류자계가 인가되는 경우에 통전손실의 기울기는 대략 2.0에 근접하였다. 이는 그림 6의 전압·전류관계에서 기울기는 1.0이고 통전손실의 기울기가 2.0것으로부터 외부 교류자계에 의한 통전손실은 일종의 저항성 손실과 유사함을 의미하고 있다. 이것은 Rabbers의 결과와 유사한 결과를 보였다.

그림 8은 외부자계가 50 mT 이상의 경우에 측정된 통전손실과 직류 전압·전류관계로부터 계산된 동저항 손실을 비교한 결과이다. 동저항 손실은 식 (1)에 의해 계산되어졌다[5].

$$Q_{dm} = \int_0^T [E_B(i) - E_{B=0}(i)] i dt \quad (1)$$

여기서  $i = i_p \sin \omega t$ 이며,  $E_B$  및  $E_{B=0}$ 는 외부 자계가 인가된 경우의 전계와 외부 자계가 없는 경우에 각각의 전계를 나타낸다. 그림 8의 결과로부터 외부자계 동저항 손실 값이 비교적 잘 일치하는 것으로 보아서 동저항 손실이 지배적임을 알 수 있었다. 그러나 외부자계가 작은 영역 15 mT 이하에서 측정된 손실 값과 계산된 동저항 손실이 큰 차이를 보였다. 외부자계가 작은 영역에서 통전손실은 동저항 이외의 또 다른 메카니즘이 있는 것으로 사려된다.

### 3. 결 론

본 연구의 외부자계가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대해서 조사한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 비교적 큰 자계가 인가된 경우 Bi-2223테이프 통전 손실은 전압리드의 배열과 무관함을 알 수 있었으며

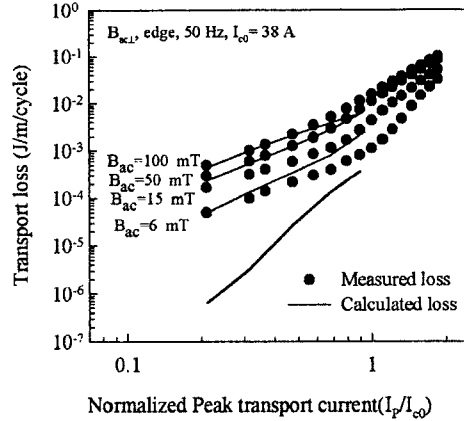


그림 8. 측정된 손실과 계산된 손실의 비교.

비교적 작은 자계가 인가된 경우 통전 손실은 전압 리드의 배열에 영향을 받았다.

- 2) 직류 전압·전류관계에서 외부교류자계가 증가함에 따라 전계는 증가하였고 외부직류자계가 인가된 경우에 직류전압·전류관계 곡선의 형태는 인가하지 않은 경우에 비해 곡선의 형태는 변화하지 않고 임계전류만 감소함을 알 수 있었다.
- 3) 외부교류자계가 증가함에 따라 통전손실은 증가하였고 외부직류 자계가 통전 손실에 미치는 영향은 외부 교류자계가 미치는 영향보다 작음을 알 수 있었다.
- 4) 큰 외부자계가 인가된 경우 통전손실은 동저항 손실이 지배적임을 알 수 있었으며 외부자계가 작은영역에서 통전손실이 동저항 손실과 큰 차이를 보이는 것으로 보아 동저항 이외의 또다른 메카니즘이 있는 것으로 사려된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 류경우, 박권배 외, "장척 Bi-2223테이프의 자기자계손실 특성," 전기학회논문지, 49B권, pp. 240-245, 4, 2000.
- [2] M. Cizek, A.M. Campbell, B.A. Glowacki, "The effect of potential contact position on AC loss measurements in superconducting BSCCO tape," Physica C, pp. 203-208, 1994.
- [3] N. Amemiya, K. Miyamoto, S. Murasawa, H. Mukai, and K. Ohmatsu, "Finite element analysis of AC transport current and / or exposed to DC or AC external magnetic field," Physica C, 1998.
- [4] J.J. Rabbers, B. ten Haken, H.H.J. ten Kate, "Measuring transport current loss of BSCCO/Ag tapes exposed to external AC magnetic field," Physica C, pp. 101-105, 1998.
- [5] J.J. Rabbers, B. ten Haken, F. Gómory, H.H.J. ten Kate, "Self-field loss of BSCCO/Ag tape in external AC magnetic field," Physica C, pp. 1-5, 1998.