

실용 Bi-2223테이프의 동저항 특성

허대행^{*}, 류경우^{*}, 황시돌^{**}
^{*}전남대학교, ^{**}한전 전력연구원

Dynamic Resistance Characteristics of a Bi-2223 Tape

Dae-Haeng Huh^{*}, Kyung-Woo Ryu^{*}, Si-Dole Hwang^{**}
^{*}Chonnam National University, ^{**}Keprri

Abstract - Bi-2223테이프의 동저항 및 동저항손실에 대해 조사하였으며, 그 주요 결과는 외부교류자장이 어느 정도 큰 경우에 한해서는 테이프의 동저항은 전류에는 의존하지 않고, 자장 및 주파수에는 비례한다. 또한 동저항손실은 전류가 증가함에 따라서 급격히 증가하며, 외부교류자장에 비례하고, 주파수에는 거의 의존하지 않는다.

1. 서 론

최근 고온초전도테이프 제조기술의 발전에 힘입어 자기자장 및 액체질소온도에서 임계전류밀도가 기존 구리도체의 허용전류밀도보다 100배정도 큰 Bi-2223테이프가 전력시스템응용을 위하여서는 필수적인 수 km 길이로 생산되고 있다. 이와 같은 고온초전도테이프는 저온초전도선재보다 운전온도가 무려 70도정도 높아짐에 따라 냉각의 관점에서는 큰 장점이 있지만 전력분야응용에서와 같이 외부 교류자장 아래서 Bi-2223테이프를 사용할 경우, 테이프에 직류전류를 흘려에도 불구하고 기존 구리도체의 전기저항과는 근본이 다른 자기적 저항(이하 동저항)이 나타나 손실(이하 동저항손실)을 유발시키며[1], 이 손실은 자화손실과 함께 교류응용에서는 매우 중요한 손실로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 현재 수 km로 생산되고 있는 Bi-2223테이프를 대상으로 하여 동저항 및 그 손실을 실험적으로 조사하였다.

2. 동저항관련 이론

고온초전도테이프에서 발생하는 교류손실은 그 공급 경로에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다. 외부자장을 통해서 간접적으로 고온초전도테이프에 공급되는 손실(자화손실)과 전류리드를 통해 직접 공급되는 손실(통전손실)로 분류된다. 또한 통전손실은 다시 외부교류자장이 인가되지 않은 상태에서 교류전류만 흘릴 때 발생하는 자기자계손실과, 외부교류자장이 인가된 상태에서 직류전류를 흘릴 때 발생하는 동저항손실, 그리고 외부교류자장이 인가된 상태에서 교류전류를 흘릴 때 발생하는 통전손실로 분류된다. 본 절에서는 특히 동저항손실과 관련된 중요한 것들에 대해 간략히 고찰하기로 한다.

특히 외부교류자장이 인가된 상태에서 고온초전도테이프에 발생하는 동저항(r_d)은 기존 구리도체의 저항에 대한 정의와 마찬가지로 식(1)과 같이 정의된다. 다만 이 둘 저항의 차이는 구리도체의 저항인 경우는 전자-격자와의 상호작용에 기인하는 전기저항인 반면 동저항은 자기적 메카니즘에 기인하는 자기저항인 점이다.

$$r_d = \frac{E}{I} (\Omega/m), \quad I \leq I_c \quad (1)$$

여기서 I 는 테이프에 흐르는 직류전류를, E 는 이 때 테이프 단위길이에서 발생한 직류전압을 각각 나타낸다. 또한 외부교류자장이 인가된 상태에서 테이프에 흐르는

직류전류에 의해서 발생하는 동저항손실(Q)은 식(2)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$Q = \frac{I^2 r_d}{f} (J/m/cycle) \quad (2)$$

여기서 f 는 외부교류자장의 주파수를 나타낸다.

마지막으로 식(1)의 동저항과 비교·검토에서 유의할 것으로 사료되는 고온초전도테이프의 임계전류를 정의하는 데 보편적으로 이용되는 전압($E_c = 10^{-4} V/m$)과 임계전류(I_c)로부터 정의되는 저항(r_c)은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_c = \frac{E_c}{I_c} (\Omega/m) \quad (3)$$

3. 실험 샘플

표1에는 동저항 특성 조사를 위한 Bi-2223테이프의 주요 사양을, 그림 1에는 그 실험장치의 개략도를 각각 나타내었다. 그림 1에서 외부자장을 발생시키기 위해서는 30 A - 50 V전원(DC - 1 kHz)을 2채널 함수발생기로 제어하여 철심형 자석에 직류 및 정현파의 교류전류를 인가하

표 1 Bi-2223테이프의 주요 사양

항 목	특 성
사이즈	3.9 mm×0.3 mm
Bi-2223/AgMgNi	25/75
필라멘트수	37
트위스트 유·무	무

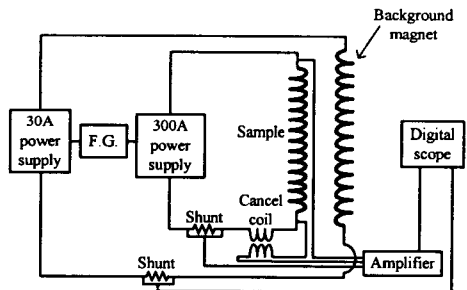


그림 1. 실험장치의 개략도.

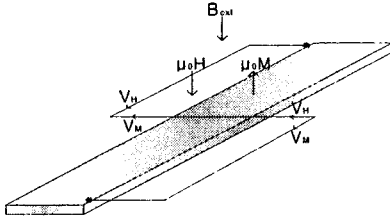


그림 2. 8자형-전압리드: 수직자장용.

여 외부자장을 만들었고, 자석의 상수는 10.7 mT/A, 공극은 45 mm × 175 mm × 10 mm이다. 또한 Bi-2223테이프에 전류를 흘리기 위해서는 300 A - 20 V 전원(DC - 1 kHz)을 상기의 동일 함수발생기로 제어하여 직류전류를 인가하였다. 자석 및 샘플에 흐르는 전류를 측정하기 위해서는 셉트를 사용했으며, 셉트 및 샘플에 장착된 전압리드로부터 나오는 신호는 절연앰프를 통해 스크로에서 기록하였다.

그림 2에는 동저항과 관련 연구를 위해 고안된 Bi-2223 테이프 샘플을 나타내었다. 그림 2의 전압리드(8자형-전압리드)의 배열에서 주요한 특징을 요약하면 그림에서 보는 바와 같이 테이프 길이방향의 축을 기준으로 양쪽에 면적이 동일한 페루프로 구성되어있기 때문에 테이프 폭에 수직인 교류자장이 인가되는 경우, 외부자장에 의해 유도되는 전압뿐만 아니라 자화에 의해 유도된 전압도 각각의 페루프에서 서로 반대 방향으로 되어 자체적으로 상쇄되는 특징이 있어 순수하게 테이프를 통해 공급되는 손실 즉 통전손실만을 측정 가능하게 한다(2).

4. 실험 결과 및 검토

표 2에는 본 실험에 이용된 Bi-2223테이프의 상이한 외부자장에 대해 측정된 임계전류를 나타내었으며, 그림 3에는 크기가 상이한 자장에 대해 측정된 Bi-2223테이프의 동저항을 나타내었다. 또한 그림 3에는 교류자장의 피크치와 동일한 크기의 직류자장을 인가할 때, 측정된 직류전압-전류특성으로부터 식(1)과 동일하게 정의되는 저항을 ●로, 특히 임계전류에서 정의되는 식(3)의 저항(r_c)을 실선으로 각각 나타내었다.

그림 3의 결과로부터 Bi-2223테이프의 동저항은 외부교류자장이 작은 5 mT인 경우는 테이프 전류가 커짐에 따라서 동저항도 증가하는 반면 외부교류자장이 10 mT 이상으로 되면 테이프 전류에는 관계없이 일정한 값으로 되는 것을 볼 수 있다. 특히 외부교류자장이 큰 경우(10 mT 이상)에 한해서는 테이프의 동저항이 외부교류자장의 크기에 비례하여 증가한다는 것과 식(3)의 임계전류로부터 정의되는 저항과 비교하여 작게는 수배에서 수백 배까지 증가하는 것을 볼 수 있다.

표 2 Bi-2223테이프의 임계전류

외부자장 (mT)	임계전류 (A)
0	27.0
5	21.6
10	15.3
20	14.0
50	10.8

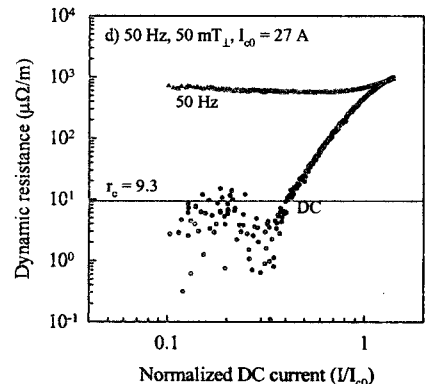
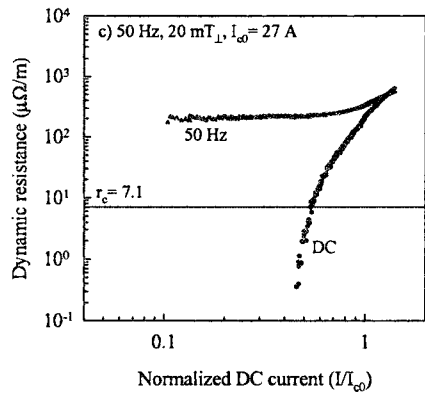
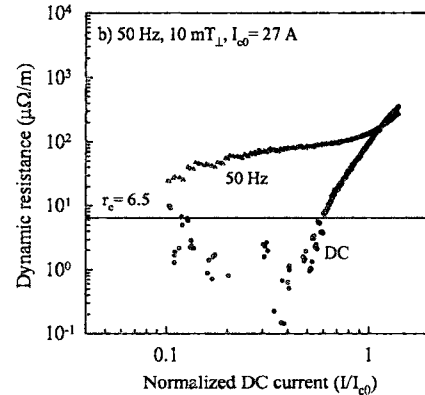
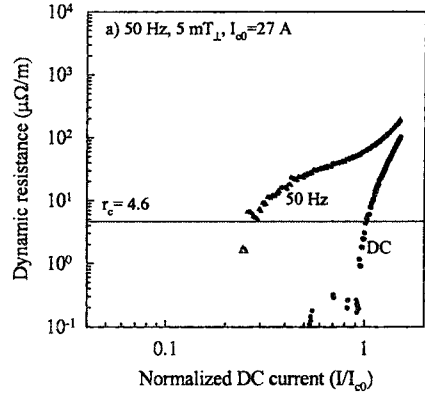


그림 3. 교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 동저항: 자의 크기에 따른 영향.

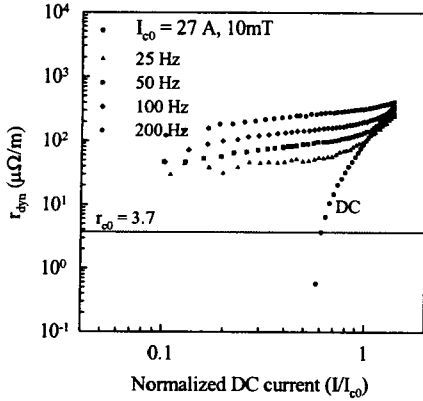
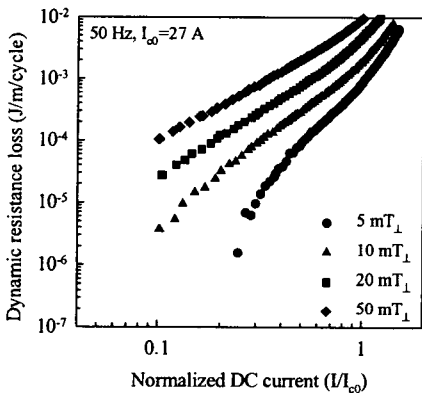


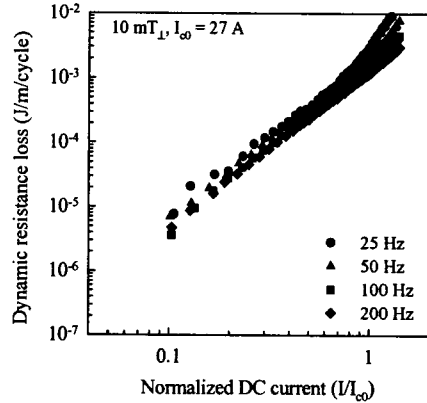
그림 4. 교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 동저항: 자의 주파수에 따른 영향.

그림 4에는 상이한 주파수의 자장에 대해 측정된 Bi-2223테이프의 동저항을 나타내었다. 또한 그림 3에서와 같이 식(1)과 동일하게 정의되는 저항을 ●로, 식(3)과 같이 정의되는 저항(r_c)을 실선으로 각각 나타내었다. 그림 4의 결과로부터 Bi-2223테이프의 동저항은 외부교류자장의 주파수가 커짐에 따라서 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있고, 일정 주파수에 대해서는 테이프 전류에 관계없이 동저항은 거의 일정한 값으로 되는 것을 볼 수 있다.

그림 5에는 상이한 자장 및 주파수에 대해 측정된 동저항손실을 나타내었으며, 그림 5로부터 Bi-2223테이프의 동저항손실은 테이프 전류가 증가함에 따라서 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 자장이 큰 경우는 동일한 테이프 전류에 대하여 외부교류자장에 비례하여 동저항손실이 증가하는 반면 주파수에는 거의 의존하지 않는 것을 볼 수 있다.



a) 자장의 크기 영향



b) 자장의 주파수 영향

그림 5. 교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 동저항손실.

5. 결 론

이상 Bi-2223테이프의 동저항 및 동저항손실에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 테이프의 동저항은 외부교류자장이 작은 경우는 테이프 전류에 의존하는 반면 외부교류자장이 커지면 전류에는 관계없이 일정한 값으로 되고, 특히 자장이 큰 경우에 한해서는 테이프의 동저항은 자장에 비례함과 동시에 외부교류자장의 주파수에도 비례한다.
- 2) 테이프의 동저항손실은 테이프 전류에 따라서 급격히 증가함과 동시에 동일 전류에 대해서는 외부교류자장에 비례하고, 주파수에는 거의 의존하지 않는다.

본 연구는 산업자원부와 한국전력공사의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 허대행, 류경우, "교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 직류전압-전류 특성", 2003년도 한국전기전자재료학회 춘계학술대회는논문집, 담양, 5월 16, 2003.
- [2] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 동전손실 특성", 대한전기학회논문지, 50B권, 6호, pp.290-294, 2001.