

교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 직류전압-전류 특성

허대행, 류경우
전남대학교

DC voltage-current characteristics of a Bi-2223 tape in AC magnetic fields

Dae-Haing Huh, Kyung-Woo Ryu
Chonnam National University

Abstract

고온초전도테이프의 전력분야 응용에서 자화손실과 함께 매우 중요한 통전손실에 대한 실험적 조사 연구를 한 결과, 외부자장이 커짐에 따라서 직류전압이 급격히 증가하였으며, 자장의 세기가 동일할지라도 교류인 경우가 직류인 경우보다 대단히 크다. 그리고 외부교류자장에 대한 직류전압-전류 특성으로부터 정의되는 동저항 또한 외부교류자장의 세기에 따라서 상이하지만 테이프의 임계전류에서 전기저항(3.7 $\mu\Omega/m$)과 비교하여 작게는 수배에서부터 크게는 수백 배까지 증가한다.

Key Words : AC magnetic field, DC voltage-current characteristic, dynamic resistance, transport current loss.

1. 서 론

60 Hz의 전력분야에 고온초전도테이프를 응용할 경우, 테이프에는 교류손실이라고 하는 손실이 발생하게되며, 이를 좀더 세분해보면 다음과 같다. 먼저 고온초전도테이프에 전류를 흘리지 않은 상태에서 테이프에 인가되는 외부교류자장에 의해서 발생하는 손실을 자화손실, 외부자장은 인가되지 않은 상태에서 테이프에 흘려준 교류전류에 의해서만 발생하는 손실을 자기자계손실, 그리고 마지막으로 외부교류자장이 인가된 상태에서 테이프에 흘려준 전류에 의해 발생하는 손실 즉 테이프를 통해 전원으로부터 공급되는 손실을 통전손실이라 하며, 이 손실은 외부자장의 크기, 방향 및 주파수 등에 의존하지만 일반적으로 자기자계손실보다 매우 커 전력분야와 같은 교류응용에 있어서는 자화손실과 함께 대단히 중요한 손실이다. 이와 같은 통전손실은 최근 연구의 진보에 힘입어 그 근원이 밝혀지고 있으며[1]-[3], 이는 외부교류자장이 인가된 상태에서 테이프에서 측정되는 직류전압-전류 특성으로부터 결정되는 동저항(dynamic resistance)이라고 불리는 자기적 메카니즘에 근거한 저항으로

알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 수 km길이로 제조되어 현재로서도 시스템에 적용이 가능한 대표적인 고온초전도체인 Bi-2223테이프에 대한 동저항을 실험적으로 조사하여 이들에 대한 검토를 하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

그림1은 외부교류자장이 인가된 상태에서 Bi-2223 테이프의 동저항을 측정하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 그림1에서 외부자장을 발생시키기 위해서는 30 A - 50 V전원(DC - 1 kHz)을 2채널 함수발생기로 제어하여 철심형 자석에 직류 및 정현파의 교류전류를 인가하여 외부자장을 만들었고, 자석의 상수는 10.7 mT/A, 공극은 45 mm × 175 mm × 10 mm이다. 또한 Bi-2223테이프에 전류를 흘리기 위해서는 300 A - 20 V전원(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 절

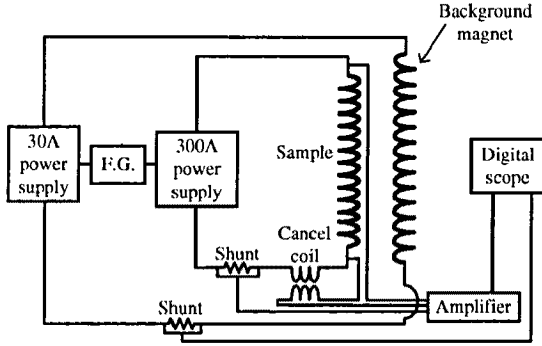


그림 1. 실험장치 개략도.

연애프를 통해 스크프에서 기록하였다.

2.2 실험샘플 및 방법

동저항 특성 조사를 위한 Bi-2223테이프의 주요 사양을 표1에, 실험샘플을 그림2에 각각 나타내었다. 그림2에서 전압리드의 배열은 8자 형태(8자형리드)로, 그 특징은 그림2로부터 알 수 있는 바와 같이 테이프 길이방향의 축을 기준으로 양쪽에 면적이 동일한 페루프로 구성되어있기 때문에 테이프 면에 수직한 교류자장이 인가되는 경우, 외부자장에 의한 유도전압뿐만 아니라 자화에 의해 유도된 전압도 각각의 페루프로 서로 반대 방향으로 되어 자체적으로 상쇄되는 특징이 있어 순수하게 테이프를 통

표 1. Bi-2223테이프의 사양

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

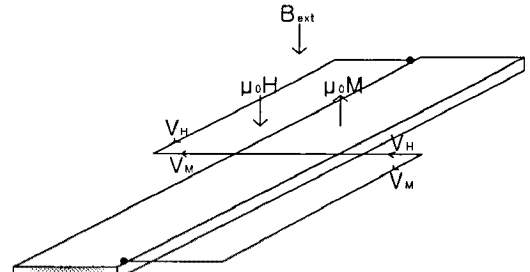


그림 2. 샘플의 전압리드 배열: 수직자장용.

해 공급되는 손실만을 측정 가능하게 한다.

외부교류자장이 인가된 상태에서 Bi-2223테이프에 발생하는 동저항(r_{dyna})은 일반 상전도체의 전기저항(electrical resistance)의 정의와 마찬가지로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 다만 동저항과 전기저항의 차이는 외부자장이 교류이나 아니면 직류이나 하는 차이 밖에 없음을 주의할 요한다.

$$r_{dyna} = \frac{E}{I} (\Omega/m) \quad (1)$$

여기서 I 는 그림2의 샘플에 흘려준 직류전류를, E 는 이 때 8자형리드의 단위길이에서 발생하는 직류전압을 각각 나타내며, 따라서 외부교류자장이 인가된 상태에서 Bi-2223테이프에 흐르는 전류(I)에 의해서 발생하는 통전손실은 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

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

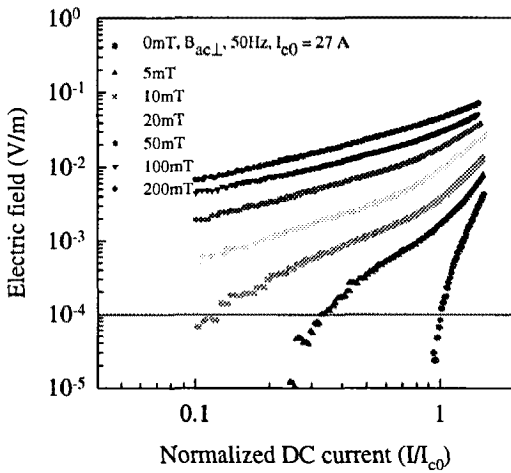
여기서 f 는 외부교류자장의 주파수를 나타낸다. 추가적으로 고온초전도테이프의 임계전류를 정의하는 데 보편적으로 사용되는 전압 ($E_{c0} = 10^{-4}$ V/m 및 임계전류로부터 임계전류가 고온초전도테이프에 흐를 때 발생하는 전기저항은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{c0} = \frac{E_{c0}}{I_{c0}} (\Omega/m) \quad (3)$$

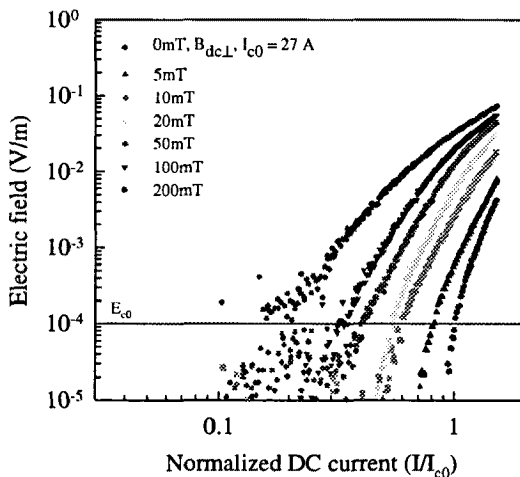
마지막으로 모든 실험은 액체질소 내 즉 77 K에서 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림3에는 테이프 면에 수직한 방향으로 외부자장이 인가된 경우, 측정된 직류전압-전류 특성을 나타내었으며, ○, △, □, ◇, ○, ▽ 및 ⊙는 외부자장이 각각 0 mT, 5 mT, 10 mT, 20 mT, 50 mT, 100 mT 및 200 mT인 경우 실험결과를, 그리고 실선은 고온초전도테이프의 임계전류를 정의하는 데 보편적으로 사용되는 단위길이당의 전압(10^4 V/m)



a) 교류 외부자장



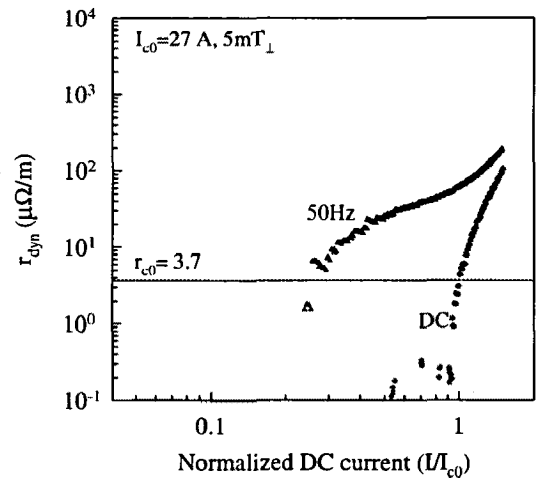
b) 직류 외부자장

그림 3. 직류전압-전류: 수직자장.

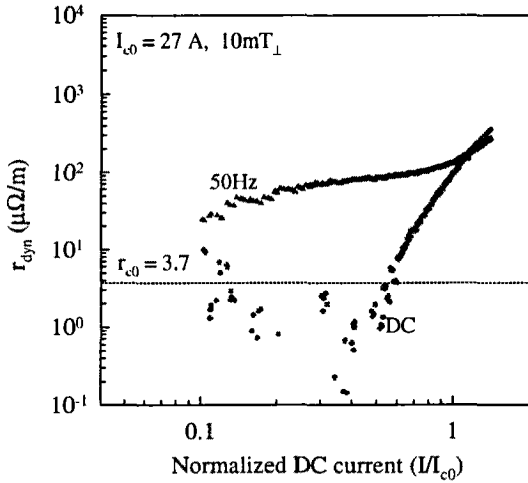
을 나타낸다. 그림3의 실험결과에서 보는 바와 같이 교류·직류에 무관하게 외부자장이 커짐에 따라 직류전압이 급격히 증가하며, 외부자장이 0 mT인 경우의 전압-전류 특성곡선과 비교하여 형상도 상이해지는 것을 볼 수 있다. 또한 외부자장이 동일(예를 들면 50 mT)할지라도 교류가 인가되는 경우 직류전압이 직류가 인가되는 경우보다 수십 배 정도까지 큰 것을 볼 수 있다.

그림4에는 테이프 면에 수직한 방향으로 외부자장이 인가된 경우 측정된 동저항을 나타내었다. 또한 동일한 외부자장에 대한 동저항 효과를 전기저항(DC로 표시된 데이터)과 정량적인 비교를 위하여 이를 동일 그래프에 함께 나타내었으며, 실선은 식(3)에 의해 도출된 고온초전도테이프의 단위길이당 전기저항을 각각 나타낸다.

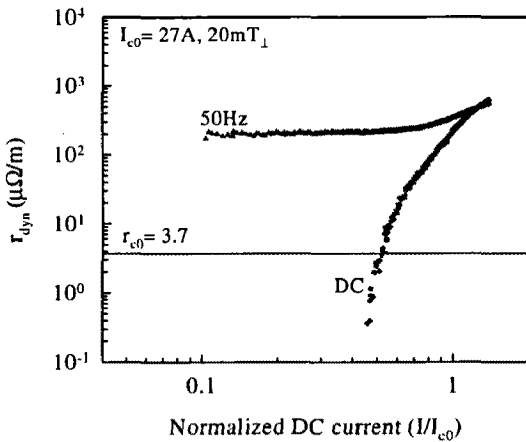
그림4의 실험결과로부터 외부교류자장의 세기가 5 mT인 경우, 고온초전도테이프에 흐르는 전류가 증가함에 따라 동저항도 함께 증가하는 것을 볼 수 있고, 외부교류자장이 10 mT 이상이 되면서부터는 동저항은 테이프에 흐르는 전류에 거의 무관하게 일정하게 되는 것을 볼 수 있다. 또한 $r_{c0} = 3.7 \mu\Omega/m$ 와 비교하여 외부교류자장의 세기에 따라서



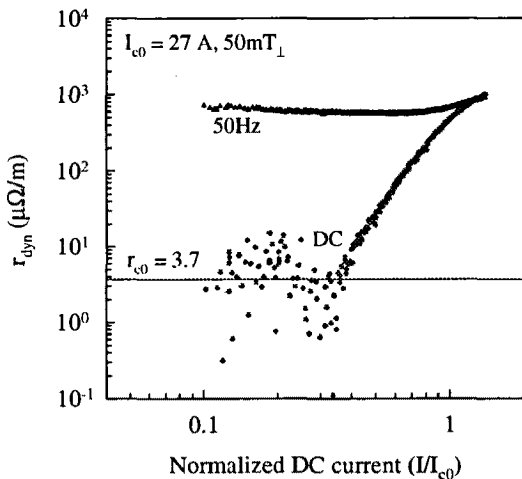
a) 외부자장 = 5 mT



b) 외부자장 = 10 mT



c) 외부자장 = 20 mT



d) 외부자장 = 50 mT

그림 4. 동저항: 수직자장.

동저항은 작게는 수배에서부터 50 mT인 경우는 수 백배까지 증가하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

이상의 Bi-2223테이프에 수직자장을 인가한 상태에서 측정된 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 직류전압은 외부자장이 커짐에 따라서 이 급격히 증가하고, 자장이 동일할지라도 교류인 경우가 직류인 경우보다 대단히 크다.
- 2) 동저항은 외부교류자장의 세기에 따라서 상이하지만 테이프의 임계전류에서 전기저항인 $3.7 \mu\Omega/m$ 와 비교하여 작게는 수배에서부터 크게는 수 백배까지 증가한다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 김창완, 한형주, 류경우, 최병주, "외부자계가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 2001년도한국초전도·저온공학회학술대회논문집, p.169, 2001.
- [2] 류경우, 김창완, 차귀수, "외부교류자장에 대한 Bi-2223테이프의 통전손실 특성", 대한전기학회논문지, 50B권, 6호, p.290, 2001.
- [3] 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*, p.101, 1998.