

외부 교류자장이 Bi-2223테이프의 동저항 및 손실특성에 미치는 영향

Effect of an External AC Magnetic Field on Dynamic Resistance and Loss Characteristic in a Bi-2223 Tape

류경우^{1,a}, 최병주²

(Ryu Kyung Woo^{1,a} and Choi Byoung Ju²)

Abstract

A Bi-2223 tape has been developed for power applications such as a fault current limiter, a power cable and a superconducting magnetic energy storage system. In such applications, the Bi-2223 tape carries time varying transport current and in addition experiences time varying external magnetic field. It is well known that the external magnetic field not only causes magnetization loss in the Bi-2223 tape, but also drastically increases transport loss due to a so-called "dynamic resistance". We developed an evaluation setup, which can measure transport loss in external ac magnetic fields. Using this equipment, we measured the dynamic resistances for various amplitudes and frequencies of an external ac magnetic field perpendicular to the face in the tape. Simultaneously we investigated the effect of an external ac field on transport loss with different experimental conditions. This paper describes test results and discussions on correlation between the dynamic resistance and the transport loss for the Bi-2223 tape.

Key Words : Dynamic resistance, Dynamic resistance loss, External ac magnetic field, 8 shaped voltage lead, Transport loss

1. 서론

기존 전선의 허용전류밀도는 응용에 따라 상이하지만 전선의 주요 응용 중 하나인 가공송전선 및 지중케이블의 경우, 허용전류밀도가 약 1 A/mm² 정도이다. 이에 비해 허용전류밀도가 100배정도 큰 장점을 지닌 고온초전도체의 경우, 현재로서는 도체가격 및 냉각비용 등 해결되어야 할 많은 문제로 상용화의 단계는 못 되지만 전선으로서 응용을 하기 위한 최소한의 기술적 측면에서 필수 요건인 장선 및 연

성을 두루 갖춘 고온초전도테이프가 수 km급으로 생산되고 있는 수준이다.

이와 같은 실용 고온초전도테이프를 이용하여 세계 각 국에서는 한류기, 에너지저장장치 및 지중케이블 등 다양한 고온초전도 전력기에 대한 연구·개발이 진행 중에 있다. 특히 3상응용의 경우, 동일 저온용기 내에 수납하는 관계로 도체는 인접한 전류에 의해 발생하는 교류 외부자장을 피할 수 없게 되며, 고온초전도체를 이와 같이 교류자장 아래서 응용하게 되면 특히 동일 크기의 직류자장 아래서는 나타나지 않는 전기저항과는 판이하게 다른 동저항(dynamic resistance)이 발생되어[1], 고온초전도테이프에 교류전류를 흘리게 되면 대단히 큰 교류손실(이하 통전손실)이 발생하게 되어 냉각비용을 크게 증가시켜 이들의 상용화를 어렵게 하고 있다. 이와 같은 문제 해결의 한 방안으로서 현재로서

1. 전남대학교 전기공학과
(광주시 북구 용봉동 300)
2. 서라벌대학 고속전기철도과
a. Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2005. 3. 28
1차 심사 : 2005. 4. 12
심사완료 : 2005. 4. 18

는 지층케이블의 경우, 3상의 케이블 코어 각각에 고온초전도테이프를 사용한 차폐도체를 추가하는 방식을 사용하고 있지만 앞서 언급한 바와 같이 고온초전도테이프의 경우 특히 고가인 점을 고려하면 최선의 대책이 아님을 알 수 있다.

따라서 이 같은 문제의 근본적인 해결을 위해서는 무엇보다도 먼저 교류 외부자장에 의해 발생하는 고온초전도테이프의 동저항 및 손실 특성에 대한 이해가 선행되어야 하며, 그 일환으로서 본 연구에서는 외부 교류자장의 크기, 주파수 및 테이프에 흐르는 전류가 이들에 미치는 영향에 대해 실험적으로 조사·검토를 하였다.

2. 동저항 기초

동일 크기의 직·교류 외부자장이라 할지라도 특히 교류자장이 고온초전도테이프에 인가되는 경우는 테이프에 직류전류를 흘림에도 불구하고 저항이 나타나게 되며, 이를 동저항(R_d)이라 한다. 기존의 전기저항은 전자-격자사이의 상호작용에 기인하는 반면 동저항은 자기적 작용에 기인하는 관계로 외부 교류자장의 크기 및 주파수뿐만 아니라 테이프에 흐르는 전류의 함수로서 매우 복잡하며, 이는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다[2].

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

여기서 E 는 테이프에서 발생하는 단위길이당 직류 전압을, I 는 직류전류를, I_c 는 임계전류를 각각 나타낸다.

또한 이와 같은 동저항은 교류자장 아래서만 발생된다는 관점에서 교류손실의 일종으로 분류되며, 특히 이를 동저항손실(Q_d)이라 하고 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_d = \oint_T i^2 R_d dt, \quad I_p \leq I_c \quad (\text{Joule}/m \cdot \text{cycle}) \quad (2)$$

여기서 T 는 교류전류의 주기를, i 는 정현파 교류전류($I_p \sin 2\pi ft$)를 각각 나타낸다.

3. 실험 샘플 및 방법

표 1에는 동저항 및 손실특성 평가에 사용된 고온초전도테이프의 주요 사양을, 그림 1에는 표 1의

표 1. Bi-2223테이프의 주요 사양.

Table 1. Specification of a Bi-2223 tape.

| | |
|-----------------|----------------|
| Bi-2223/Ag/Ag합금 | 27 %/43 %/30 % |
| 테이프의 폭과 두께 | 3.9 mm×0.3 mm |
| 필라멘트의 수 | 37 |
| 트위스트 피치 | ∞ mm |

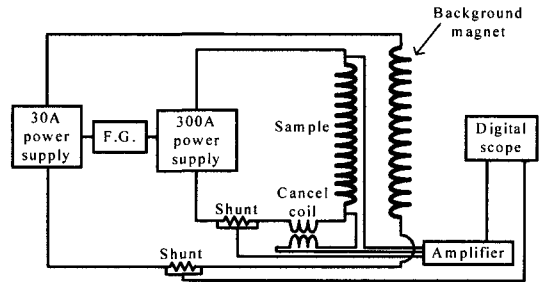


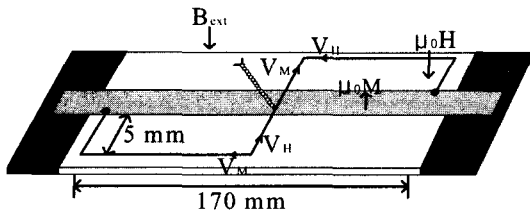
그림 1. 특성 평가장치의 개략도.

Fig. 1. Schematic of the evaluation setup.

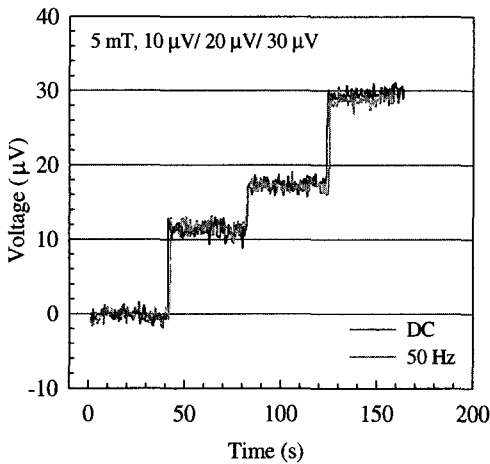
테이프에 대한 특성평가를 위해 이용된 장치의 개략도를 각각 나타내었다. 그림 1에서보는 바와 같이 평가장치는 외부 교류자장을 공급하기 위한 전원(30 A급) 및 전자석, 테이프에 직·교류전류를 공급하는 샘플용 전원(300 A급), 외부 교류자장에 의한 영향을 배제 가능한 특수구조의 샘플홀더로 구성되어 있다. 본 연구의 모든 손실 평가실험에서는 외부 교류자장과 샘플에 흐르는 교류전류의 주파수 및 위상은 함수발생기를 이용하여 동일하게 제어하였으며, 테이프 자신에 흐르는 교류전류에 의해 발생하는 유도성 전압은 Rogowski형 코일을 이용하여 충분히 상쇄하여 손실을 측정하였고, 또한 모든 실험에서 외부자장의 방향은 테이프에 수직인 방향으로 하였다.

그림 2에는 샘플홀더 및 그 특성 평가결과를 각각 나타내었다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 외부자장($\mu_0 H$) 및 이에 의해 유도된 자화($\mu_0 M$)에 의해서 발생하는 전압인 V_H 및 V_M 은 각각 그 방향이 서로 반대가 되어 상쇄된 결과, 전압리드(이하 8자형리드)에는 오직 고온초전도테이프에 흐르는 전류에 의한 전압만 측정됨을 알 수 있다.

그림 2(b)는 동일 크기(5 mT)의 직·교류(50 Hz) 외부자장을 인가한 상태에서 그림 2(a) 홀더에 장착된 고온초전도테이프를 제거하는 대신 정밀전압발생기(Yokogawa-CA11, $\geq 10 \mu V$)로부터 인



(a) 샘플홀더의 개략도



(b) 샘플홀더의 특성

그림 2. 외부자장에 대한 샘플홀더의 특성.

Fig. 2. Characteristics of the sample holder in the external magnetic fields.

력되는 전압(10 μV , 20 μV , 30 μV)에 대하여 8자형 리드로부터 측정된 결과로서, 낮은 전압인 10 μV 에서는 $\sim 20\%$ 이던 오차가 입력전압이 커짐에 따라 즉 30 μV 에서는 $\sim 3\%$ 로, 외부자장에도 불구하고 8자형리드로부터 측정된 데이터에 대한 신뢰성은 대단히 우수함을 볼 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 3에는 Bi-2223테이프의 측정된 전계 및 동저항의 외부자장 의존성을 각각 나타내었다. 그림 3(a)은 수직한 직류자장을 인가한 상태에서 측정된 전계로서 실선은 고온초전도체의 임계전류를 정의하는데 자주 사용되는 값인 10^{-4} V/m을 나타내며, 이 결과로부터 외부 직류자장이 인가되지 않은 경우 Bi-2223테이프의 임계전류(I_{c0})가 29 A정도이던

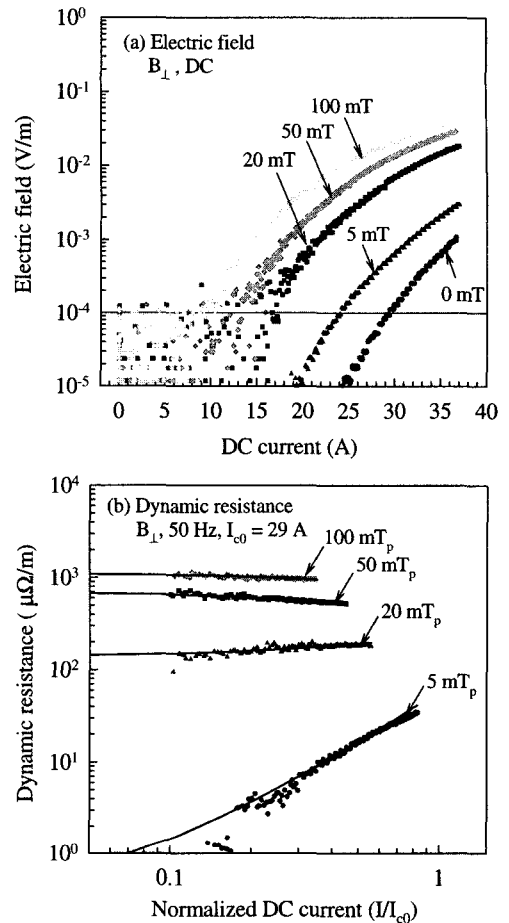


그림 3. Bi-2223테이프에 대한 (a) 전계 및 (b) 동저항의 외부자장 의존성.

Fig. 3. External field dependence of (a) the electric field and (b) dynamic resistance in the Bi-2223 tape.

것이 100 mT로 증가함에 따라 ~ 10 A로 감소하는 것을 볼 수 있다.

그림 3(b)은 (a)과 동일한 크기의 피크 값을 갖는 50 Hz의 교류자장을 인가한 상태에서 측정된 동저항으로서, 실선은 동저항 데이터에 대한 fitting함수를 나타낸다. 그림 3(b)으로부터 Bi-2223테이프는 임계전류이하임에도 불구하고 교류자장이 인가되기만 하면 커다란 동저항이 출현함과 동시에 외부 교류자장에 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있고, 또한 비교적 외부자장이 큰 경우(20 mT_p 이상)는 동저항이 테이프에 흐르는 전류에 의존하

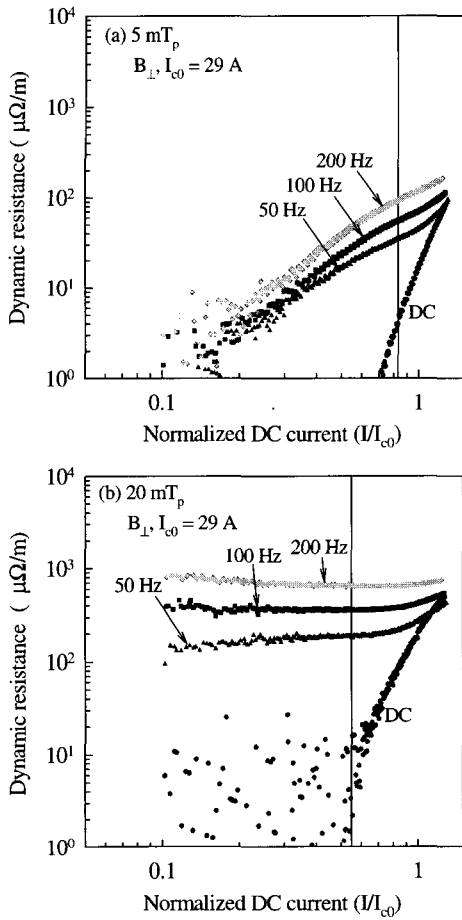


그림 4. Bi-2223테이프에 대한 동저항의 주파수 의존성.

Fig. 4. Frequency dependence of the dynamic resistances in the Bi-2223 tape.

지 않고 일정한 반면 작은 경우(5 mT_p이하)는 전류에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 4에는 외부 교류자장의 주파수를 달리했을 때 Bi-2223테이프에 대해 측정된 동저항을 나타내었으며, 그림에서 각각의 외부자장(5 mT, 20 mT)에 대응되는 테이프의 임계전류를 실선으로, 그리고 동저항과 비교를 위해 동일 크기의 직류자장(DC) 아래서 측정된 저항(동저항이 아님에 주의)도 함께 나타내었다.

그림 4의 결과로부터 측정된 동저항은 동일 크기의 직류자장 아래서 측정된 저항보다 크기는 수십 배까지도 크다는 사실과 모든 전류영역에 걸쳐 외부자장의 크기에 관계없이 주파수가 증가함에

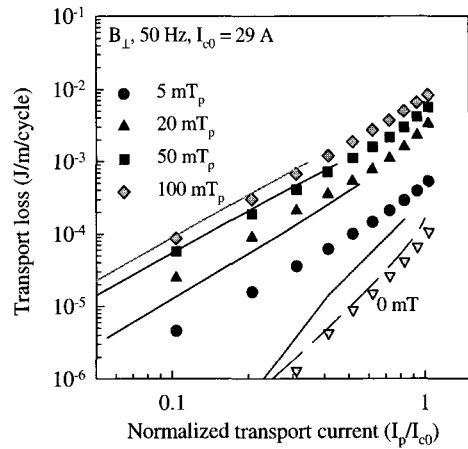


그림 5. Bi-2223테이프에 대한 통전손실의 외부자장 의존성.

Fig. 5. External field dependence of the transport losses in the Bi-2223 tape.

따라 동저항도 함께 증가하는 것을 볼 수 있다.

그림 5에는 Bi-2223테이프의 측정된 통전손실의 외부자장 의존성을 나타내었다. 그림 5에서 통전손실은 앞서 설명한 바와 같이 8자형리드(그림 2)의 특수성 때문에 외부 교류자장에 의해서 Bi-2223 테이프에 유도되는 자화손실이 완전히 배제된, 즉 순수한 통전전류에 의한 손실을 의미한다. 측정된 통전손실과 비교를 위하여 자기자계손실(0 mT)도 함께 나타내었으며, 그림 5에서 파선은 Norris모델로부터 계산된 손실 값을[3], 실선은 상이한 외부자장(5 mT_p, 20 mT_p, 50 mT_p, 100 mT_p) 아래서 측정된 그림 3(b)의 동저항과 식 (2)으로부터 계산된 동저항손실을 각각 나타낸다.

그림 5의 결과로부터 보는 바와 같이 측정된 자기자계손실은 Norris모델로부터 계산된 값과 잘 일치하며, 동일 전류에서 측정된 통전손실은 자기자계손실보다 크기는 백배까지도 커짐을 볼 수 있다. 또한 비교적 큰 외부 교류자장(20 mT_p, 50 mT_p, 100 mT_p) 아래서 측정된 통전손실은 식 (2)으로부터 계산된 동저항손실과 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 5 mT_p의 경우, 통전전류가 큰 영역에서는 측정값과 계산값 사이의 오차가 작은 반면 특히 통전전류가 작은 영역에서는 이들 사이의 오차가 대단히 큼을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터 비교적 큰 외부 교류자장 아래서 측정된 통전손실은 그림 3(b)의 동저항에 근거한 동저항손실 메카니즘이 지배적임을 의미하고,

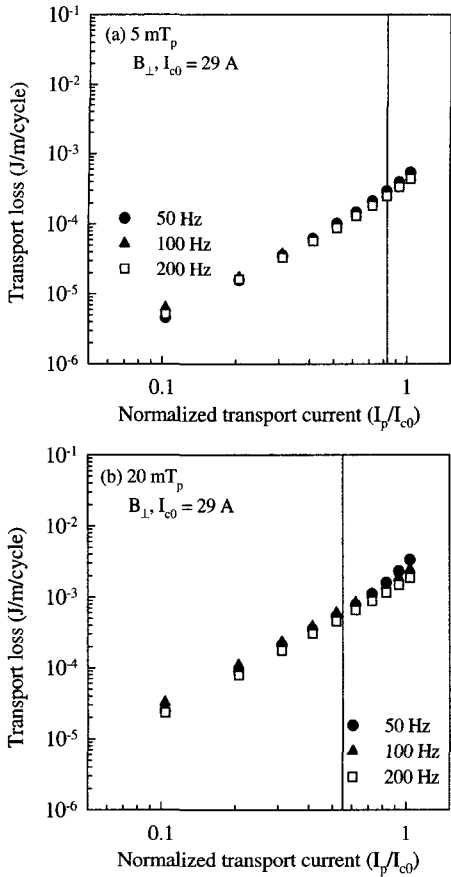


그림 6. Bi-2223테이프에 대한 통전손실의 주파수 의존성.

Fig. 6. Frequency dependence of the transport losses in the Bi-2223 tape.

따라서 이러한 경우는 측정이 어려운 통전손실을 직접 측정하는 대신 그림 3(b)의 동저항을 측정함으로써 통전손실을 예측하는 것이 가능하게 된다. 그러나 작은 외부 교류자장 아래서 특히 임계전류보다 많이 작은 통전전류 영역에서 측정된 통전손실은 동저항손실 메카니즘으로는 설명이 불가능하며 이는 또 다른 손실 메카니즘이 존재함을 의미한다.

그림 6에는 외부 교류자장의 주파수를 달리했을 때 Bi-2223테이프에 대해 측정된 통전손실을 나타내었으며, 그림에서 각각의 외부자장(5 mT, 20 mT)에 대응되는 테이프의 임계전류를 실선으로 나타내었다.

그림 6의 결과로부터 보는 바와 같이 임계전류 이하의 영역에서 측정된 통전손실은 외부 교류자

장에 관계없이 주파수에 의존하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 5의 결과에서 지적한 바와 같이 특히 큰 외부 교류자장(20 mT_p) 아래서 측정된 통전손실의 주요 메카니즘이 동저항손실임에도 불구하고 고온초전도체의 자기자계손실 및 자화손실처럼 역시 히스테리시스손실임을 의미한다[4,5].

5. 결론

이상의 외부 교류자장이 Bi-2223테이프의 동저항 및 손실 특성에 미치는 영향에 대한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 외부 교류자장으로 인하여 발생하는 동저항은 외부자장의 크기 및 주파수에 의존할 뿐만 아니라 특히 외부자장이 작은 경우는 테이프에 흐르는 자신의 전류에도 의존하는 등 매우 복잡하다.
- 2) 외부 교류자장의 영향으로 인하여 통전손실은 자기자계손실보다 대단히 커지게 되며, 특히 비교적 큰 자장영역에서 측정된 통전손실의 주요 메카니즘은 동저항손실로 고온초전도체의 자기자계손실 및 자화손실처럼 히스테리시스손실이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참고 문헌

- [1] 허대행, "실용 고온초전도체의 통전손실 특성", 석사학위논문, 전기공학과, 전남대학교, p. 17, 2004.
- [2] 허대행, 류경우, 이기만, 오일성, "수직 교류자장에 대한 HTS테이프의 동저항손실 특성", 한국초전도·저온공학회 2004학술대회논문집, p. 158, 2004.
- [3] 류경우, 최병주, "인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.
- [4] 류경우, 김현준, "자장방향이 적층 Bi-2223도체의 자화손실에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 16권, 1호, p. 77, 2003.
- [5] 류경우, 최병주, "전류분포가 3본-도체의 임계전류/교류손실 특성에 미치는 영향", 전기전자재료학회논문지, 16권, 5호, p. 418, 2003.