

실용 고온초전도체의 동저항 특성

류경우*, 최병주**, 김해중***, 성기철***

전남대학교*, 서리벌대학**, 전기연구원***

Dynamic Resistance Characteristics of a Technical High-Tc Superconductor

K. Ryu*, B.J. Choi**, H.J. Kim***, K.C. Seong***

CNU*, SORABOL**, KERI***

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.

1. 서론

최근 실용 고온초전도테이프를 이용하여 세계 각국에서는 한류기, 에너지저장장치 및 지중케이블 등 다양한 고온초전도 전력기기에 대한 연구·개발이 진행 중에 있다. 특히 3상용용의 경우, 동일 저온용기 내에 수납하는 관계로 도체는 인접한 전류에 의해 발생되는 교류 외부 자장을 피할 수 없게 되며, 고온초전도체를 이와 같이 교류자장 아래서 용용하게 되면 특히 동일 크기의 직류 자장 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.

따라서 이 같은 문제의 근본적인 해결을 위해서는 무엇보다도 먼저 교류 외부자장에 의해 발생되는 고온초전도테이프의 동저항 및 손실 특성에 대한 이해가 선행되어야하며, 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(Rd)이라 한다. 기존의 전기저항은 전자-격자사이의 상호작용에 기인하는 반면 동저항은 자기적 작용에 기인하는 관계로 외부 교류자장의 크기 및 주파수 뿐만 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 E는 테이프에서 발생되는 단위길이당 직류전압을, I는 직류전류를, Ic는 임계전류를 각각 나타낸다. 또한 이와 같은 동저항은 교류자장 아래서만 발생된다는 관점에서 교류손실의 일종으로 분류되며, 특히 이를 동저항손실(Qd)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 T는 교류전류의 주기를, i는 정현파 교류전류($I_p \sin 2\pi ft$)를 각각 나타낸다.

3. 실험 샘플 및 방법

표 1에는 동저항 및 손실태성 평가에 사용된 고온초전도테이프의 주요 사양을, 그림 1에는 표 1의 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 자체에 흐르는 교류전류에 의해 발생되는 유도성 전압은 Rogowski형 코일을 이용하여 충분히 상쇄하여 손실을 측정하였고, 또 한 모든 실험에서 외부 자장의 방향은 테이프에 수직한 방향으로 하였다.

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

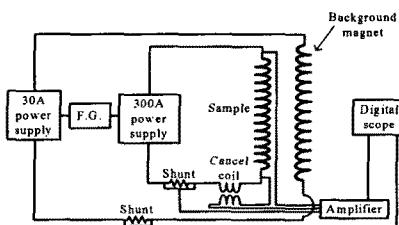
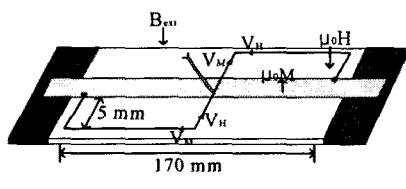


그림 1. 특성 평가장치의 개략도.

Fig. 1. Schematic of the evaluation setup.



(a) 샘플홀더의 개략도

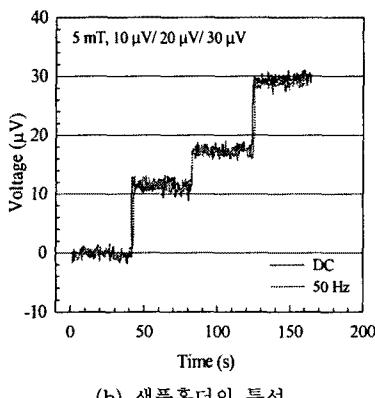


그림 2. 외부자장에 대한 샘플홀더의 특성.

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

그림 2에는 샘플홀더 및 그 특성 평가결과를 각각 나타내었다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 외부자장(μ_0H) 및 이에 의해 유도된 자화(μ_0H)에 의해서 발생되는 전압인 V_{Hl} 및 V_{Ml} 은 각각 그 방향이 서로 반대가 되어 상쇄된 결과, 전압리드(이하 8자형리드)에는 오직 고온초전도 테이프에 흐르는 전류에 의한 전압만 측정됨을 알 수 있다.

그림 2(b)는 동일 크기(5 mT)의 직·교류(50 Hz) 외부

자장을 인가한 상태에서 그림 2(a) 홀더에 장착된 고온초전도테이프를 제거하는 대신 정밀전압발생기(Yokogawa-CA11, $\geq 10 \mu\text{V}$)로부터 입력되는 전압($10 \mu\text{V}$, $20 \mu\text{V}$, $30 \mu\text{V}$)에 대하여 8자형리드로부터 측정된 결과로서, 낮은 전압인 $10 \mu\text{V}$ 에서는 $\sim 20\%$ 이던 오차가 입력전압이 커짐에 따라 즉 $30 \mu\text{V}$ 에서는 $\sim 3\%$ 로, 외부자장에도 불구하고 8자형리드로부터 측정된 데이터에 대한 신뢰성은 대단히 우수함을 볼 수 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

그림 3은 50 Hz의 교류자장을 인가한 상태에서 측정된 동저항으로서, 실선은 동자항 데이터에 대한 fitting함수를 나타낸다. 그림 3으로부터 Bi-2223테이프는 임계전류이하임에도 불구하고 교류자장이 인가되지만 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 의존하지 않고 일정한 반면 작은 경우(5 mT_p 이하)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 크게는 수십 배까지도 크다는 사실과 모든 전류영역에 걸쳐 외부자장의 크기에 관계없이 주파수가 증가함에 따라 동저항도 함께 증가하는 것을 볼 수 있다.

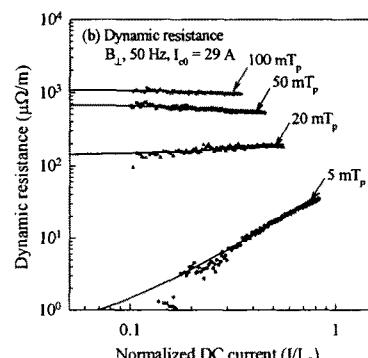


그림 3. Bi-2223테이프에 대한 (a) 전계 및 (b) 동저항의 외부자장 의존성.

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

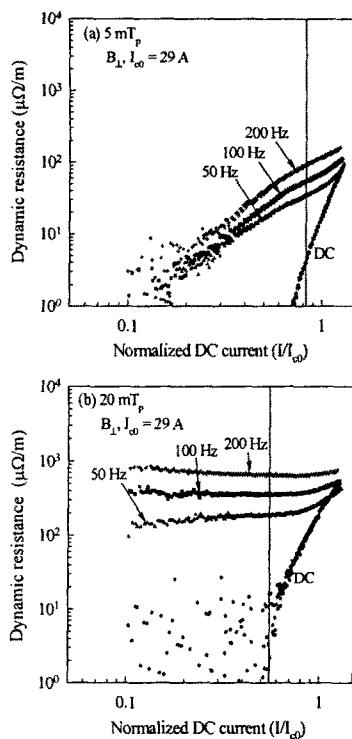


그림 4. Bi-2223테이프에 대한 동저항의 주파수 의존성.
Fig. 4. Frequency dependence of the dynamic resistances in the Bi-2223 tape.

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 자

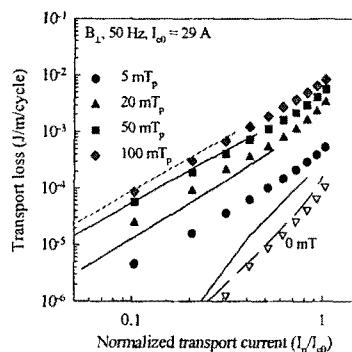


그림 5. Bi-2223테이프에 대한 통전손실의 외부자장 의존성.

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

화손실이 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 mTp, 20 mTp, 50 mTp, 100 mTp) 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 크게는 백배까지도 커짐을 볼 수 있다. 또한 비교적 큰 외부교류자장(20 mTp, 50 mTp, 100 mTp) 아래서 측정된 통전손실은 식 (2)으로부터 계산된 동저항손실과 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 5 mTp의 경우, 통전전류가 큰 영역에서는 측정값과 계산값 사이의 오차가 작은 반면 특히 통전전류가 작은 영역에서는 이를 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, 따라서 이러한 경우는 측정이 어려운 통전손실을 직접 측정하는 대신 그림 3(b)의 동저항을 측정함으로서도 통전손실을 예측하는 것이 가능하게 된다.

5. 결론

- 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.
- 1) 외부 교류자장으로 인하여 발생되는 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 자장 영역에서 측정된 통전손실의 주요 메카니즘은 동저항손실로 고온초전도체의 자기자계손실 및 자화손실처럼 히스테리시스손실이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 허대행, “실용 고온초전도테이프의 통전손실 특성”, 석사학위논문, 전기공학과, 전남대학교, p. 17, 2004.
- [2] 허대행, 류경우, 이기만, 오인성, “수직 교류자장에 대한 HTS 테이프의 동저항손실 특성”, 2004년도 한국초전도·저온공학회 학술대회논문집, p. 158, 2004.
- [3] 류경우, 최병주, “인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.