

고온초전도선재의 교류손실 해석 및 실험

류 경 우
전남대학교 전기공학과

AC loss analysis and experimental evaluation of a high temperature superconductor

Kyung Woo Ryu
Dept. of EE, Chonnam National Univ.

Abstract

Bi-2223 tapes have been developed for low-field power applications at liquid nitrogen temperature. When the Bi-2223 tapes are used in an application such as a power transmission cable or a power transformer, they are supplied with an AC transport current and exposed to an external magnetic field generated by neighboring tape's AC currents simultaneously. AC loss taking into account such real applications is a crucial issue for power applications of the Bi-2223 tapes to be feasible. In this paper, the transport losses for different AC current levels and arrangements of the neighboring tapes have been measured in a 1.5 m long Bi-2223 tape. The significant increase of the transport losses due to neighboring tape's AC currents is observed. An increase of the transport losses caused by a decrease of the Bi-2223 tape's critical current is a minor effect. The measured transport losses could not be explained by a dynamic resistance loss based on DC voltage-current characteristics in combination with the neighboring tape's AC currents. The transport losses do not depend on the frequency of the neighboring tape's AC currents but its arrangements in the range of small current especially.

1. 서론

Bi-2223테이프의 장선화 기술의 진전에 따라 전력 에너지분야에서 다양한 응용가능성을 제시하고 있다. 대표적인 응용 예로서 전력용변압기, 송전케이블, 한류기 등을 들 수 있다. 이들 시스템의 상용화 설계 및 실용화개발에 있어서 Bi-2223테이프의 교류손실에 대한 연구는 중요 요소기술 중에 하나이다.

현재, 단독 테이프도체의 교류손실 측정기술은 상당히 발전하여 통전손실과 이 손실에 영향을 미치는

각종 요소에 대한 연구가 이루어져 있다[1-3]. 한편, 기기의 상용화 응용측면에서 공학적 가치를 높이기 위해서는 기기에서의 Bi-2223테이프 조립·운전상태를 보다 정확하게 모의한 해석 및 실험 모델과 기법이 개발되어야 한다. 에너지용용 기기의 경우, 테이프도체 자신은 교류전류를 통전하고, 동시에 인접 테이프의 교류전류에 의해서 발생하는 외부 자장에 직접 노출된 환경에서 운전되고 있다.

본 논문에서는 단독 Bi-2223테이프의 통전손실에 있어서 전압리드의 형상이 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 그리고, 하나의 테이프를 측정하고자 하는 Bi-2223테이프 위에 두고 또 다른 하나의 테이프는 Bi-2223 테이프 옆에 둔 두개의 인접 테이프로 구성되는 도체계에서 통전손실을 측정하였다. 또한 인접 테이프도체에 흐르는 교류전류와 조합된 환경 하에서 직류 전압-전류특성을 조사하였다.

2. 본론

2.1 실험

본 연구에 사용된 고온 초전도도체는 은 합금 시스의 다심 필라멘트 구조로 된 Bi-2223테이프로서 그 중요한 사양을 표 1에 나타낸다.

다수의 이전 실험에서 밝혀진 바와 같이, Bi-2223테이프의 통전손실은 테이프에 부착하는 전압리드의 위치에 따라 대단히 의존한다[4-7]. 따라서, 이들 영향을 정확하게 조사하기 위하여 서로 다른 2 종류의 시료를 준비하였다. 하나의 시료는 전압리드 형상에 따른 영향을 조사하기 위하여 단독의 Bi-2223테이프에 4개의 독립된 전압리드를 납땀하여 준비하였다. 전압리드의 형상은 그림 1 a)와 같다. 또 다른 하나의 시료는 인접 교류전류의 영향을 조사하기 위하여 폭 50 mm, 두께 3 mm의 G-10 판 위에 절연시킨 3개의 테이프를 구성하였다. 실제의 사용환경을 모의하기 위하여, 그림 1 b)에 나타낸 바와 같이 측정하고자 하는 테이프를 인접 테이프의 옆에, 그리고 또 다른 하나의 테이프 바로 아래에 배치하였다. 전압탭 간의 거리는 모든 전압리드에 있어서 동일하게 1.5 m으로 하였다.

300 A, 20 V 전원(PS-300)을 사용하여 단독 Bi-2223테이프에 정현파 전류를 통전시켰다. 인접 테

표 1 Bi-2223테이프의 파라미터
Table 1 Parameters of a Bi-2223 Tape

| | |
|---------------------|---------------------------------------|
| Bi-2223/AgMgNi | 25/75 |
| Dimensions | 3.5 mm × 0.3 mm |
| Number of filaments | 37 |
| Filament twist | No |
| Yield strength | 15×10 ⁶ kgf/m ² |
| Insulation | Bare |

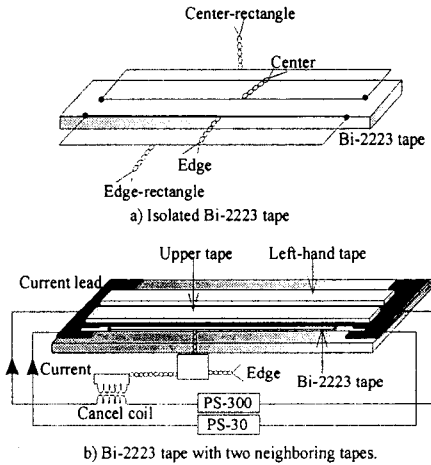


그림 1. 시료의 개략도
Fig. 1. Schematic of the samples.

이프에 교류전류가 흐르는 경우에 있어서, 손실을 구하기 위하여 측정하고자 하는 Bi-2223테이프에 30 A, 50 V 전원공급기(PS-30)을 사용하여 통전시켰다. 좌측테이프와 상부테이프는 그림 1 b)에 나타낸 바와 같이 각각 독립적인 회로를 구성하여 PS-300 전원으로 동일방향으로 전류를 흘렸다. 두 전원의 위상이 서로 같아지도록 2-채널파형 발생기를 사용하여 제어하였다.

본 연구에서는 77 K, 주파수 10~150 Hz의 범위에서 실험을 실시하였고, 인접 테이프의 교류전류는 0~160 A로 가변 하였으며, 교류전류의 위상은 셉트를 이용하여 구하였다. 그림 1 a)에 나타낸 모든 전압리드에 대하여, 전류리드 주위에 설치한 상쇄코일(cancel coil)을 이용하여 유도성분을 보상하였다. 그러나, 본 실험에서 중심(center)과 가장자리(edge) 전압리드에 대해서는 유도전압을 보상할 필요가 없음을 확인하였으며, 따라서 가장자리 전압리드를 이용하여 인접 테이프에 교류전류가 흐르는 환경 하에서 통전손실을 측정하였다. 또한, 인접 테이프 자장에 의한 전압리드 간의 유도전압은 인접 테이프에 전류를 공급하는 전선 주위에 설치한 상쇄코일로서 보상시켰다.

측정된 손실전압은 각종 변수, 즉 전압리드의 형

상, 주파수, 인접 테이프의 교류전류 및 배열 등에 따라 상이해지며, 측정된 손실전압의 기본파 성분은 FFT(Fast Fourier Transformation)를 이용하여 구하였다. 또한 단위길이에 대한 평균 통전 손실은 $I_p E_p / (2l)$ 관계식을 이용하여 구하였으며, 여기서, I_p 는 통전전류의 피크치, E_p 는 손실전계의 기본파 성분의 피크치, f 는 주파수이다.

2.2. 결과 및 고찰

4개의 전압리드에 대하여 50 Hz 주파수에서 단독 Bi-2223테이프를 이용하여 측정된 통전 손실을 그림 2에 나타낸다. 그림 2에서 I_{ω} 는 자기자장에서 테이프의 임계전류이다. 중심(center) 전압리드의 손실은 가장자리(edge), 가장자리-사각(edge-rectangle), 중심-사각(center-rectangle) 전압리드의 손실보다 현저히 적고, 이들 측정치들은 비록 작은 통전전류 영역에서

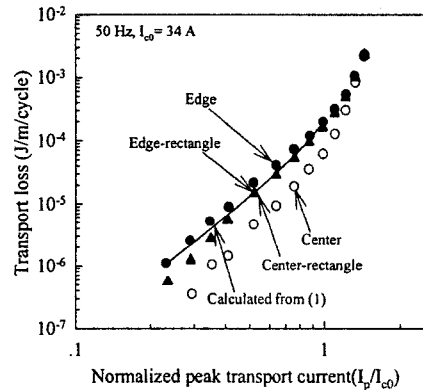


그림 2. 각종 전압리드 형상에 대한 통전손실 - 정규화된 피크전류 관계.

Fig. 2. Transport loss vs. normalized peak current for several voltage lead configurations.

약간의 차이는 있으나, 그림에서 실선으로 나타낸 이론치와는 잘 일치한다. 또한, 그림 2에서 나타낸 바와 같이, 가장자리 전압리드를 이용하여 통전손실을 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다. 가장자리 전압리드는 가장자리-사각 및 중심-사각 전압리드와 비교하여 가장 작은 유도전압을 가진다.

자기자장에 대한 타원 단면을 가진 초전도체의 히스테리시스 손실은 다음 식(1)로 주어진다[7].

$$Q = \frac{\mu_0 I_a^2}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_p}{I_a}\right) \ln\left(1 - \frac{I_p}{I_a}\right) + \frac{(2 - I_p/I_a)I_p}{2I_a} \right\} \quad (1)$$

여기서, μ_0 는 자유공간의 투자율, I_a 는 자기자장에서 테이프의 임계전류이며, I_p 는 통전전류의 피크치이다. Bi-2223테이프의 이방성(anisotropy) 및 불균일성(inhomogeneity)인 전자 특성에도 불구하고,

통전손실에 대한 계산치는 측정치와 비교적 잘 일치한다.

그림3은 가장자리 전압리드를 사용하여 각종 주파수에 대해서 측정한 통전손실을 나타낸다. 또한 식 (1)을 이용하여 계산한 손실치를 그림 3에 실선으로 함께 도시하였다. 손실 측정치는 주파수에 무관하며, log-log좌표에서 개략적으로 통전전류의 3승에 따라

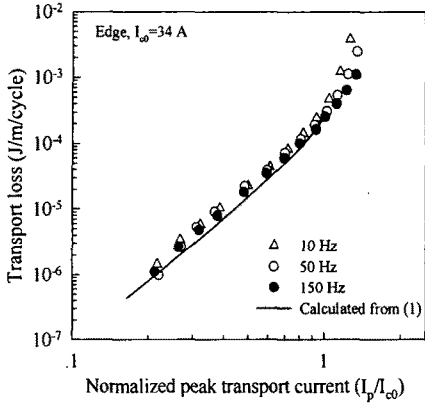


그림 3. 통전전류의 각종 주파수에 대한 통전손실 - 정규화된 피크 전류(가장자리 전압리드 사용).

Fig. 3. Transport loss vs. normalized peak transport current for various frequencies of the transport current using the edge voltage lead.

변화하는 특성을 보인다. 이 결과는 단독 Bi-2223테이프의 통전손실이 10 Hz ~ 150 Hz의 주파수 영역에서 히스테리성임을 의미한다.

직류 전압-전류특성에 미치는 인접테이프의 교류전류의 영향에 대하여 4단자 측정법으로 조사하였다. 좌측 테이프의 각종 교류피크 전류(I_{Left})에 대하여 전계를 직류 통전전류(I)의 함수로서 나타내면 그림 4와 같다. 또한 비교를 위하여, 직류 전류 160A에 대한 데이터를 그림4에 함께 도시하였다. 전계는 인접 테이프 교류 전류의 증가와 함께 증가하는 특성을 나타낸다. 인접 테이프 교류 전류의 영향은 직류 전류에 의한 전계특성과 기본적으로 다르며, 외부교류자장이 직류전압-전류특성에 미치는 영향도 이와 유사한 결과인 것으로 보고되어 있다[8].

가장자리 전압리드를 사용하여 좌측테이프의 교류전류에 대하여 Bi-2223테이프의 통전손실을 측정하였다. 좌측 테이프 전류가 통전전류와 동 위상일 때, 피크 통전전류의 함수로서 통전손실을 나타내면 그림 5와 같다. 또한, 좌측 테이프의 직류 전류가 통전손실에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 직류 160 A에 대한 측정치를 그림 5에 함께 도시하였다.

통전손실은 인접 테이프의 교류전류의 증가와 함께 급격하게 증가한다. 좌측테이프에 전류가 흐르지 않는 경우, 직류 160 A에서의 손실과 거의 일치한다. 그러나, 직류전류 160 A에 대한 통전손실은 그와 동일한 교류전류에서의 통전손실보다 훨씬 적다.

이 결과는 직류전류의 영향은 교류전류의 영향과 비교하여 무시할 수 있음을 의미한다. 임계전류의 감소에 따른 통전 손실의 증가에 의한 영향은 단지 미미하다.

더구나, 좌측 테이프 교류전류가 0 A에서 160 A까지 변화할 때, log-log 좌표에서 손실 데이터의 기울기나, 좌측 테이프 교류전류가 0 A에서 160 A까지 변화할 때, log-log 좌표에서 손실 데이터의 기울기는 3.3에서 2.0까지 변화한다. 이것은 인접 테이프 교류전류에 기인하는 통전손실은 일종의 저항성 손실임을 의미한다. 그림 5에서, 실선은 실험적으로 정해지는 그림 4의 직류 전압-전류 데이터로부터 얻은 동저항손실(dynamic resistance loss)을 나타낸다. 통전전류 $i = I_p \sin \omega t$ 에 대한 단위 사이클당의 동저항손실은 식 (2)로 주어진다[8].

$$Q_{dyn}(B) = \int_0^T \{E_B(t) - E_{B=0}(t)\} i dt \quad (2)$$

여기서, B 는 외부 교류자장, T 는 통전전류의 주기, E_B 와 $E_{B=0}$ 는 각각 교류자장 B 와 $B=0$ 에서의 Bi-2223테이프의 직류 전계이다. 이 저항은 교류자장에 의

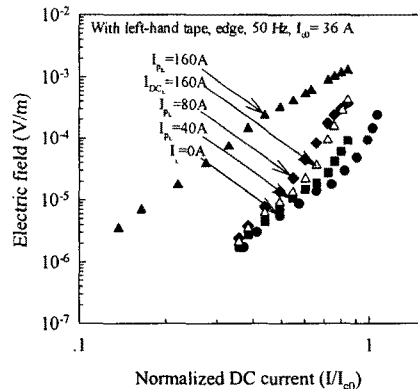


그림 4. 좌측테이프의 각종 교류전류에 대한 전계 - 정규화된 직류 통전전류(가장자리 전압리드를 사용).

Fig. 4. Electric field vs. normalized DC transport current for various AC currents of the left-hand tape using the edge voltage lead.

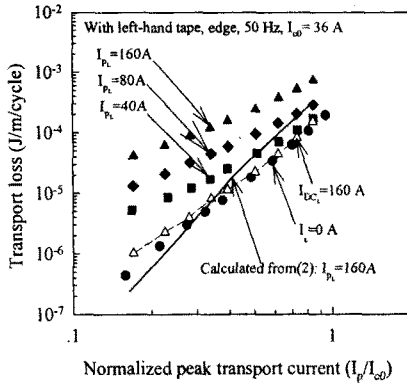


그림 5. 좌측 테이프의 각종 교류 전류에 대한 통전 손실 - 정규화된 피크 통전전류(가장자리 전압리드를 사용).

Fig. 5. Transport loss vs. normalized peak transport current for various AC currents of the left-hand tape using the edge voltage lead.

하여 유도되는 차폐전류와 통전전류사이의 상호작용에 의해 야기된다. 따라서, 외부 교류자장 환경 하에서 통전전류를 일정치로 유지하기 위해서는 전원에서부터 Bi-2223테이프에는 더 많은 전력을 공급하여 주어야 한다. 그림 5로부터, 측정 통전손실과 식 (2)로부터 구한 손실 사이에는 차이가 매우 큼을 알 수 있다. 이 결과는 인접 테이프 교류전류에 기인하는 통전손실의 급격한 증가 현상을 동적저항만으로는 충분히 설명할 수 없고, 또 다른 메카니즘이 존재함을 의미한다.

그림 6은 좌측 테이프 인접전류의 주파수가 기준 테이프의 통전손실에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과이다. 그림 6의 결과에서, 통전전류의 주파수와

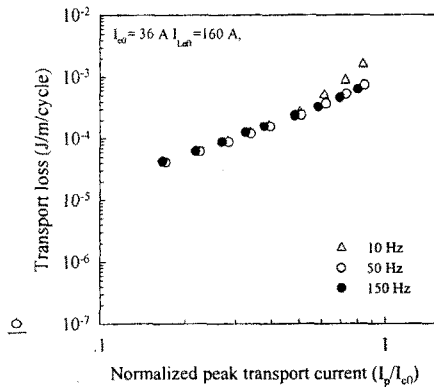


그림 6. 좌측테이프의 각 주파수에 대한 통전손실 - 정규화된 피크통전전류(가장자리 전압리드를 사용).

Fig. 6. Transport loss vs. normalized peak transport current for different frequencies of the left-hand tape's AC current using the edge voltage lead.

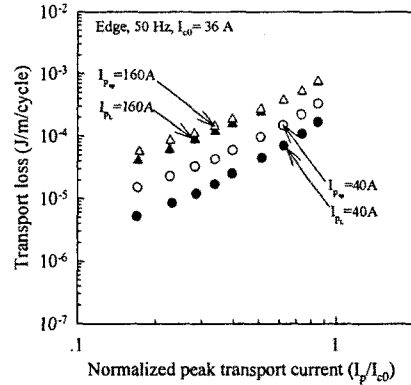


그림 7. 인접 테이프의 각종 배치방법에 대한 통전 손실 - 정규화된 피크 통전 전류(가장자리 전압리드를 사용).

Fig. 7. Transport loss vs. normalized peak transport current for different arrangements of the neighboring tapes using the edge voltage lead.

좌측 테이프의 교류전류의 주파수는 서로 동일하였으며, 또한 통전전류와 좌측 테이프의 전류의 위상도 같다. 이 결과는 인접 테이프의 교류전류에 기인하는 통전손실은 인접 테이프의 교류전류의 주파수에는 무관함을 의미한다.

그림 7은 인접 테이프, 즉 좌측 테이프와 상부 테이프의 여러 다른 배열이 기준 테이프의 통전손실에 미치는 영향을 비교한 결과이다. 그림 7의 결과로부터 알 수 있는 것처럼, 인접 테이프의 교류전류가 비교적 작을 경우, 상부 테이프에 의한 통전손실은 좌측 테이프에 의한 통전 손실과 비교하여 상대적으로 크다. 그러나, 인접 테이프의 교류전류가 크게 되면, 그들의 배치에 관계없이 거의 일정하게 됨을 알 수 있다.

3. 결론

단독 Bi-2223테이프의 통전손실은 이방성 및 불균일한 전자기적 특성에도 불구하고, 입계전류가 자장과 무관하며 초전도체가 등방성이라고 가정하여 유도한 식 (1)의 이론치와 아주 잘 일치한다. 또한 통전손실은 주파수에 영향을 받지 않으며, 따라서 단독 Bi-2223테이프의 통전손실은 히스테리성 손실이다.

인접 테이프의 교류전류는 Bi-2223테이프의 통전손실을 현저하게 증가시키는 반면 인접 테이프의 직류전류에 의한 통전손실의 증가는 아주 미미하다. 인접 테이프의 교류전류와 동적저항으로부터 구한 이론치와의 차이는 매우 크다. 이 결과는 인접 테이프의 교류전류에 기인하는 통전손실의 급격한 증가현상을 동적저항만으로는 충분히 설명할 수 없고, 또 다른 메카니즘이 존재함을 의미한다. 측정된 통전손실은 인접 테이프의 교류전류의 주파수와 무관하다. 인접 테이프의 교류전류가 비교적 작을 경우, 통전

손실은 테이프의 배치에 의존하며, 상부 테이프의 통전손실이 좌측 테이프의 손실보다 크다. 그러나, 이 현상은 인접 테이프의 교류전류가 크게 됨에 따라 사라진다.

4. 참고문헌

- [1] H. Eckelmann, M. Daumling, M. Quilitz, W. Goldacker, "AC transport current losses of multifilamentary Bi(2223) tapes with varying filament geometries", *Physica C* 295, pp. 198-208, 1998.
- [2] Y. Yang, T. J. Hughes, E. Martinez and C. Beduz, F. Darmann, "Reduction of AC loss in AG sheathed PbBi2223 tapes with twisted filaments in external and self-fields", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 1177-1180, 1998.
- [3] Y. B. Huang, M. Dhalle, F. Marti, G. Witz and R. Flukiger, St. Clerc and K. Kwasnitza, "Oxide barriers and their effect on AC losses of Bi,Pb(2223) multifilamentary tapes", *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 1173-1176, 1998.
- [4] S. A. Awan, S. Sali, C. M. Friend and T. P. Beales, "Self-field a.c. losses in mono- and multi-filamentary Bi-2223/Ag tapes at power frequencies", *Cryogenics*, vol. 37, no. 10, pp. 633-635, 1997.
- [5] M. Ciszek, A. M. Campbell, B. A. Glowacki, "The effect of potential contact position on AC loss measurements in superconducting BSCCO tape", *Physica C* 233, pp. 203-208, 1994.
- [6] L. Jansak, F. Chovanec, J. Kokavec, M. Jergel, "Critical current anisotropy and AC losses in Bi(Pb)SrCaCuO-2223 and TlBaCaCuO-2212 Ag sheathed superconducting tapes", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 4, pp. 2788-2791, 1996.
- [7] S. Fleshler, L. T. Cronis, G.E. Conway, and A. P. Malozemoff, "Measurement of the ac power loss of (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x composite tapes using the transport technique", *Appl. Phys. Lett.* 67 (21), 20, pp. 3189-3191, 1995.
- [8] J. J. Rabbers, B. ten Haken, F. Gomory, H. H. J. ten Kate, "Self-field loss of BSCCO/Ag tape in external AC magnetic field", *Physica C* 300, pp. 1-5, 1998.