

## A study on the safe operation condition for Bi-2223/Ag tapes with applied alternating currents

S. W. Yim<sup>a</sup>, S. H. Sohn<sup>b</sup>, S. D. Hwang<sup>b</sup>, S. H. Lim<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Research Center of Industrial Technology, Chonbuk National University, Chonju, Korea

<sup>b</sup> Advanced Technology Center, Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea

Received 20 August 2004

### 교류용 Bi-2223/Ag 선재의 안정 통전 조건에 관한 연구

임성우<sup>a</sup>, 손송호<sup>b</sup>, 황시돌<sup>b</sup>, 임성훈<sup>a</sup>

#### Abstract

Bi-2223/Ag tapes need to be safe, even it is under the over-critical current state for the protection of a superconducting power machine. However, it is not easy to identify the condition for the safe operation because of their broad S/N transition region. In this paper, for the study of the operation condition of Bi-2223/Ag tapes, we investigated the  $V-I$  curves and the temperature variation of Bi-2223/Ag tapes experimentally, applying alternating over-currents, and analyzed the relationship between resistance and temperature increase. For the experiments, a Bi-2223/Ag tape of 57 A  $I_c$  was prepared, and the over-critical current characteristics under adiabatic state from LN<sub>2</sub> was measured. From the experiments, we confirmed that the Joule heating predicted by  $V-I$  curve corresponded with the increase of the measured temperature exactly. Using the results, a safe operation condition of Bi-2223 tape was discussed.

**Keywords** : alternating over-current, Bi-2223/Ag tapes, Joule heating, temperature increase

#### I. 서론

현재까지 교류 초전도 전력 기기 연구는 통전 시 교류손실저감 등을 고려한 설계 및 개발 등의 연구가 주로 이루어져 왔다. 그러나 최근 초전도 전력 기기의 실계통 적용을 위한 실증 시험 등의 연구가 시작되어 최적 운전 조건 확립, 사고전류 보호 대책 등 초전도 도체의 교류 과전류 통전특성 등에 관한 연구 역시 주요 연구 과제로써 고려되고 있다.

한편, Bi-2223/Ag 초전도 선재는 고 임계특성을 가지며 기기 적용에 적합한 기계적 강도를 보여 초전도 기기의 도체로써 주로 사용되고 있다. 따라서 초전도 기기의 보호를 위한 연구에 있어 이들 선재의 과전류 통전특성에 대한 정확한 이해는 매우 중요한 요소가 된다.

그러나 Bi-2223/Ag 선재의 과전류 통전 특성은 임계특성뿐만 아니라 초전도체 및 피복재의 물성 등에 복합적으로 의존하므로 퀘칭 현상에 의한 사고 기준을 판단하는데 어려움이 따른다. 따라서 과전류 인가 시 발생된 줄열에 의해 결정되는 퀘칭 거동 분석을 위해 다양한 해석 및 실험적 연구가 요구된다. [1,2]

\*Corresponding author. Tel : +82 42 865 7523  
e-mail : shsohn@kepri.re.kr

본 연구에서는 교류 과전류 인가 시 Bi-2223/Ag 선재의 켄치 거동을 분석하여 안정적인 통전조건에 대한 기준을 제시하고자 하였다. 우선, 선재의 과전류 크기 및 인가 시간에 따른 전압-전류 및 저항 변화 특성을 조사하였다. 이를 바탕으로 저항변화로부터 유추된 줄열을 단열 상태의 선재에서 발생한 실제 온도 변화를 검출하여 그 결과를 상호 비교하였으며, 최종적으로 과전류 인가 시간과 크기에 따른 선재의 온도 변화를 유추하였다.

## II. 실험 방법

Table 1에 제시된 바와 같이 77 K, 0 T 하에서 57 A의 임계전류를 갖는 Bi-2223/Ag 선재를 이용하여 과전류 통전 특성을 조사하였다. Fig. 1의 개략도와 같이 20 cm의 초전도 선재에 15 cm 간격으로 전압 단자를 배치하고 양단에 전류도입선을 연결하여 4 단자법을 이용하여 인가 전류 크기 및 인가 시간에 따른 전류-전압 특성을 조사하였다. 선재에 사고 전류를 모의하기 위하여 9 주기 동안 임계전류의 약 10 배에 해당하는 과전류를 단계적으로 인가하였다. 과전류에 의해 발생된 줄열은 선재 표면에 부착된 E형 열전대를 통하여 검출되었다.

이 때, 선재를 냉각하고 있는 액체 질소와 발생된 줄열과의 단열 상태를 유지하기 위하여 스티로폼을 이용하여 선재를 둘러싸게 했으며, 냉각은 전류 리드를 통한 전도에 의존하도록 하였다.

Fig. 2는 본 실험에 사용된 선재의 임계온도와 온도에 따른 저항 변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 Bi-2223/Ag 선재는 106 K의 임계

Table 1. Properties of the tested HTS tape(고온초전도 선재의 특성).

임계전류 [1 $\mu$ V/cm 기준, 77 K, 0 T 하]	57 A
임계온도 [K]	106
초전도체/피복재	Bi-2223/Ag-alloy
단면적 [mm <sup>2</sup> ]	3.81 $\times$ 0.193

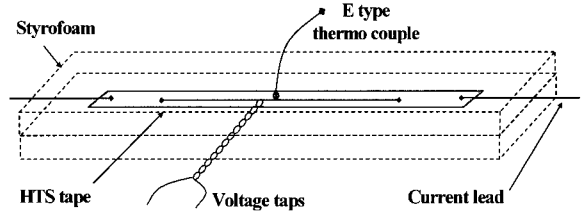


Fig. 1. HTS tape for measuring voltage and temperature variations in adiabatic state from LN<sub>2</sub>(초전도선재의 전압 및 온도 측정 방법).

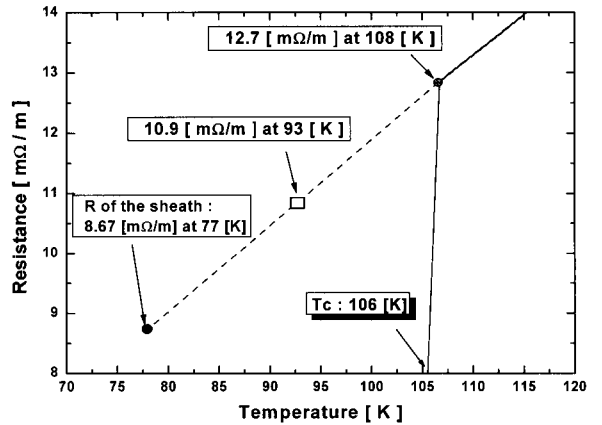


Fig. 2. Resistance variation of the Bi-2223/Ag tape extrapolated in the range from 77 K to T<sub>c</sub>(온도(77K-T<sub>c</sub>)에 따른 선재의 저항 변화).

온도를 가지므로 106 K를 초과하는 온도에서 초전도체의 저항은 급격히 증가한다. 이러한 점을 고려할 때, 임계온도 이상의 온도에서의 선재의 저항은 초전도체를 제외한 은 합금 피복재의 저항에 전적으로 의존한다고 생각할 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 저항이 감소하기 시작하는 108 K에서의 피복재의 저항은 12.8 m $\Omega$ /m로 검출되었으며, 피복재 저항이 온도 변화에 따라 선형적으로 변화한다는 가정 하에 계산된 77 K에서의 피복재 저항은 8.67 m $\Omega$ /m로 계산되었다.

## III. 결과 및 고찰

Bi-2223/Ag 선재에 최대치가 임계전류를 초과하는 교류 과전류를 인가한 경우, 인가 시간 및 크기에 따라 발열과 냉각을 반복하며 과전

류 통전 특성이 결정된다. [3] Fig. 3 (a)는 Table 1의 Bi-2223/Ag 선재에 295 A<sub>p</sub>를 인가하여 전압-전류 특성을 측정된 결과이다. 인가 전류의 최대치가 임계전류의 약 5 배에 해당하여 Bi-2223/Ag 선재의 임계전류를 완전히 초과한 상태이므로 검출 전압은 인가 시간에 따라 서서히 증가하고 있다. 그러나 인가 전류가 시변하는 관계로 선재는 임계온도를 초과하지 않고 플럭스 플로우 상태를 유지하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 3 (b)는 전압-전류의 관계로부터 유추한 Bi-2223/Ag 선재의 저항 증가를 나타내고 있다. 과전류 인가 시간이 경과 함에 따라 저항은 점차 증가하여 9 주기 경과 이후 10.9 mΩ/m까지 이르렀음을 알 수 있다. 온도에 따른 선재의

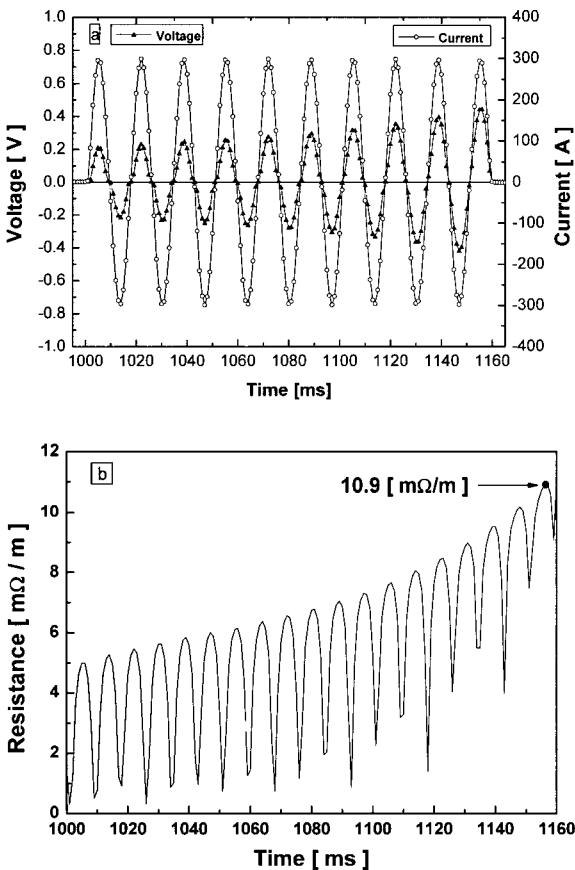


Fig. 3. (a)  $V$ - $I$  curve and (b) resistance increase of HTS tape that 295 A<sub>p</sub> is applied (295 A<sub>p</sub>를 인가한 경우 선재의 (a) 전압-전류 곡선 및 (b) 저항 증가).

저항 변화를 나타낸 Fig. 2의 결과와 비교하여 유추할 때, Fig. 3의 9 주기 경과 시 발생한 최대 저항은 Bi-2223/Ag 선재의 줄열이 93 K일 때의 저항과 상응한다는 것을 알 수 있다.

한편 이상적인 경우, 전기 및 열에너지의 상호 관계는 다음의 관계식으로 표현된다.

$$E = \int v i dt = V \int C_p dT \quad (1)$$

( $V$ : 선재의 체적,  $C_p$ : 비열,  $T$ : 온도)

식 1에 의하면 통전 전류와 전압과의 관계로부터 도체에서의 온도변화를 얻을 수 있다. Fig. 1에 제시된 바와 같이 Fig. 3의 선재에서 발생한 줄열은 단열 상태에서 완전히 보존되었으므로 선재에 과전류에 의해 발생되어 축적된 줄열을 손실없이 검출할 수 있다. Fig. 4는 과전류 인가 후 열전대를 통해 검출된 Bi-2223/Ag 선재의 온도 변화를 나타내고 있다. 그림으로부터 줄열에 의한 온도 증가는 최대 16 K에 이르렀음을 알 수 있다.

초전도 상태를 유지하고 있는 Bi-2223/Ag 선재의 온도가 77 K임을 고려하면 선재의 온도는 발생한 줄열에 의해 93 K에 도달했음을 유추할 수 있다. 이 결과를 Fig. 3의 결과와 비교해보면, Fig. 3과 4의 온도 측정 결과는 서로 일치한다는 것을 알 수 있다. 또한 이로부터 Bi-2223/Ag 선재의 전압-전류 특성을 측정하여 과전류 인가 시 발생하는 선재의 온도 변화를 유추하는 것이 가능하다고 판단할 수 있다.

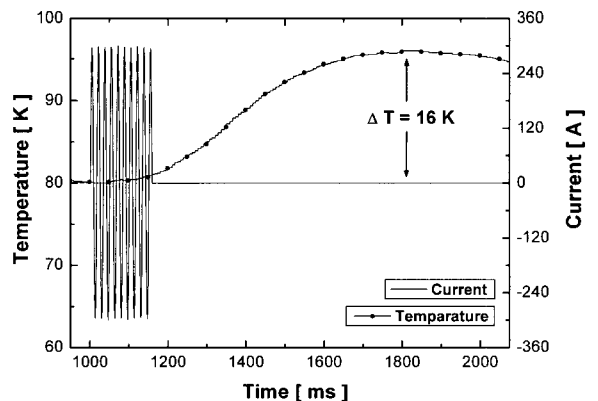


Fig. 4. Temperature increase after 295 A<sub>p</sub> was applied to the HTS tape (295 A<sub>p</sub>를 인가한 경우 선재의 온도 증가).

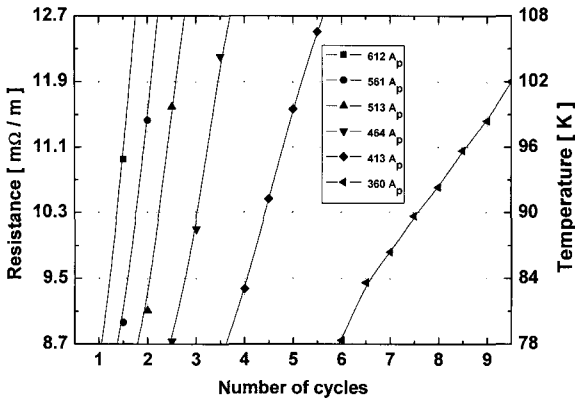


Fig. 5. Resistance and temperature variation as a function of the magnitude and duration of the applied current to Bi-2223/Ag tape. In this case, the adiabatic state is not adopted, and entire surface of the tape is exposed to LN<sub>2</sub> for sufficient cooling(인가전류의 크기 및 인가 시간에 따른 Bi-2223/Ag 선재의 저항 및 온도 변화).

이상의 결과를 바탕으로 Fig. 3의 결과에 대해 인가 전류 크기와 인가 시간을 임계전류의 10 배 이상의 영역까지 증가시키며 전압-전류 특성 및 저항 변화를 조사하였다. 이 경우, 충분한 냉각을 고려하여 전체 선재를 액체 질소에 노출시켰다.

Fig. 5는 액체 질소의 기화열인 77 K를 초과하는 영역으로부터 임계온도인 106 K에 도달하는 영역에 대해 인가 전류의 크기와 시간에 따른 저항 및 온도 변화를 나타내고 있다. 이 결과로부터 과전류 인가 시 선재의 안정 통전 조건을 판단할 수 있다. 예를 들어, 350 A<sub>p</sub>를 6 주기 동안 인가할 경우, 선재의 온도가 액체 질소의 기화온도인 77 K를 초과하여 기화하게 될 것임을 알 수 있다. 또한 413 A<sub>p</sub>가 5.5 주기 이상 인가될 경우, 선재의 임계온도를 초과하여 선재의 손상 가능성이 존재함을 예측할 수 있다.

#### IV. 결론

임계전류 57 A의 Bi-2223/Ag 선재를 이용하여, 임계전류를 초과하는 과전류를 인가하여 전압-전류 특성과 저항 증가에 대한 결과를 얻었으며 이를 통해 인가 전류와 줄열 발생의 관계에 대해 조사하였다. 결과를 바탕으로, 과전류 인가 시 고온초전도 선재의 전압-전류 특성으로부터 발생된 줄열을 간접적으로 유추하여 Bi-2223/Ag 선재의 안정적인 통전 영역에 대한 고찰이 가능하였다. 본 연구의 결과에 기초하여 절연 및 냉각 조건 그리고 기기의 형상 등을 고려한 추가적인 파라미터를 적용한다면 향후 Bi-2223/Ag 선재로 구성된 전력기기의 사고 전류에 대한 보호를 위한 연구의 기초자료로써 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### Acknowledgments

This work was supported in part by the Electric Power Industry Technology Evaluation & Planning and the Post-doctoral Fellowship Program of Ministry of Commerce, Industry & Energy (MOCIE), Republic of Korea.

#### References

- [1] J. Duron, F. Grilli, B. Dutoit, and S. Stavrev, "Modeling the E-J relation of high-T<sub>c</sub> superconductors in an arbitrary current range", *Physica C*, vol. 401, pp. 231-235, 2004.
- [2] 임성우, 김혜림, 황시돌, "Analysis on current distribution in Bi-2223/Ag tapes with applied alternating over-critical current", *한국전기전자재료학회 논문지*, 제11권 제2호, pp. 154-161, 2004.
- [3] 임성우, 최용선, 황시돌, 한병성, "과전류 인가 시 고온초전도 선재의 켈치 특성", *Progress in superconductivity*, vol. 4, no. 2, pp. 184-188, 2003.