

과전류 인가에 따른 Bi-2223 선재의 온도변화 특성

이성수, 임성우, 최용선, 손승호, 황시돌  
한국전력공사 전력연구원

Investigation of the temperature variation in Bi-2223 tapes under fault current for protection of HTS power machines

Sung-Soo Lee, Seong Woo Yim, Yong-sun Choi, Song-Ho Sohn, Si Dole Hwang  
Korea Electric Power Research Institute, Advanced Technology Center

**Abstract** 초전도 선재를 전력 기기에 적절히 응용하기 위하여 사고 시 과전류에 대한 안전성 여부를 확인할 필요가 있다. 본 논문에서는 임계전류 이상의 영역에서 Bi-2223 선재의 저항 및 온도변화 특성을 알아보았다. 임계전류가 57 A인 Bi-2223 선재에 임계 전류 이상의 과전류를 인가한 후 전류 크기 및 사고시간에 따른 저항 변화를 조사하였다. 또한 열전대를 사용하여 과전류 인가에 따른 선재의 온도 변화를 측정하여 저항에 의해 유추한 결과와 상호 비교하였다. 이로부터 Bi-2223 선재에 과전류 인가 시 발생된 저항으로부터 간접적으로 얻은 선재의 온도와 측정된 줄열은 매우 잘 일치하였으며, 이로부터 과전류 인가 시간과 크기에 따른 선재의 온도 변화를 예측할 수 있었다.

1. 서 론

고온초전도 선재는 일반 상전도 도선에 비하여 매우 높은 전류 통전 능력을 가지나, 정상 전류를 초과하는 과전류에 대해 안전성을 보장하기 어려운 단점이 존재한다. 통전 전류가 초전도체의 임계전류를 초과하는 경우, 초전도성을 잃고 상전도체로 변화하게 되는데 이때 발생하는 저항은 일반도체의 100 배 이상에 도달한다. [1] 이에 의해 발생하는 줄열은 매우 크므로 초전도 선재가 손상될 가능성이 존재하며, 주위를 둘러싸고 있는 액체 질소 또한 열에 의해 기화하게 되어 기기 운전에도 영향을 미치게 된다. [2]

최근 제작되고 있는 고온초전도 케이블, 변압기 등의 초전도 전력기기는 대부분 분말 충전법으로 제작된 선재를 이용하고 있다. 이들 선재는 초전도체와 그 주위를 보호하고 있는 양질의 도전체로 구성된다. 이러한 형상으로 인하여 통전 전류가 초전도 선재의 임계온도를 초과하는 경우, 초과된 전류의 일부는 상대적으로 저항이 작은 피복재를 통해 흐르게 된다. 이러한 특성은 과전류 인가에 의한 안정성 예측을 더욱 어렵게 하는 요소가 된다. 그러나 고온초전도 선재로 이루어진 전력기기의 보호를 위해서는 예기치 않은 사고 전류에 대한 기기의 특성을 완전히 파악하고 이에 대한 대책을 마련할 필요가 있다. 이를 통해 정상상태 운전 뿐만 아니라 과도상태 운전에도 대한 기준을 정할 수 있을 것이기 때문이다.

고온초전도 선재의 안정성 평가를 위해서는 이러한 점을 고려하여 해석적인 방법이 많이 연구되고 있으나, 실험적 고찰을 위해 임계 전류 초과에 의한 저항 증가와 줄열 발생의 관계를 조사할 필요가 있다. [3-4] 과전류 인가 시 발생한 줄열과 온도관계는 다음의 관계식으로부터 유추할 수 있다.

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

(V : 선재의 체적, C<sub>p</sub> : 비열)

즉, 통전 전류와 저항에 의해 발생한 전압과의 관계로부터 이 때 발생한 온도차를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. [5]

본 연구에서는 고온초전도 선재의 과전류 통전 시 발생하는 특성을 실험적으로 조사하기 위하여 Bi-2223 선재의 과전류 크기 및 인가 시간에 따른 저항 변화 특성을 조사하였다. 또한 식 (1)에 기초하여 선재에서 발생한 줄열을 측정하고 그 특성을 분석하였다. 온도 측정을 위하여 가장 일반적으로 사용되는 열전대를 사용하였으며, 발생한 줄열과 액체질소와의 열교환을 배제하기 위하여 스티로폼을 이용하여 시편을 단열하여 측정하였다.

2. 실험 방법

과전류 특성 실험에 사용된 고온초전도 선재에 대한 특성을 표 1에 나타내었다. 표 1에 제시된 바와 같이 실험에 사용된 고온초전도 선재는 분말충진법에 의해 제작된 Bi-2223 선재이며 77K, 0T 하에서 57A의 임계전류를 갖는다.

인가 전류 크기 및 인가 시간에 따른 전류-전압 특성을 조사하기 위하여 20cm의 선재에 15cm 간격으로 전압 단자를 배치하였으며, 양단에 전류도입선을 연결하여 4 단자법을 이용하여 측정하였다. 또한 과전류에 의해 발생된 줄열을 측정하기 위하여 그림 1과 같이 E형 열전대를 선재 표면에 부착하였다. 선재를 냉각하고 있는 액체 질소와 발생된 줄열과의 단열 상태를 유지하기 위하여 스티로폼을 이용하여 선재를 둘러싸게 했으며, 냉각은 전류 리드를 통한 전도에 의존하도록 하였다.

사고 전류를 모의하기 위하여 Bi-2223 선재에 5 주기 동안 임계전류의 6배 이상의 과전류를 단계적으로 인가하여 전압-전류 관계를 측정하였다.

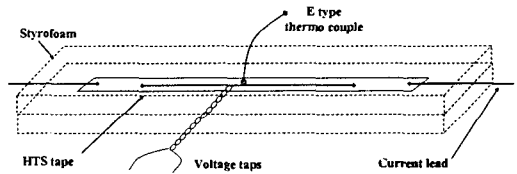


그림 1. 선재 배치 및 측정 방법

표 I. 고온초전도 선재의 특성

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

### 3. 실험결과 및 고찰

식 (1)에서 제시된 바와 같이 과전류 통전 시 발생하는 저항의 크기를 통하여 발생하는 줄열을 간접적으로 얻을 수 있다. 본 실험에 사용된 고온초전도 선재는 106 K의 임계온도를 갖는 Bi-2223 고온초전도 선재로써 106 K를 초과하는 온도에서 초전도체의 저항은 매우 커지므로, 결국 선재의 저항은 임계온도 이상의 온도에서 선재의 저항은 피복재의 저항에 해당한다고 가정할 수 있다. 이러한 가정 하에 임계전류를 초과하는 영역의 초전도 선재의 온도에 따른 저항 변화와 이로부터 유추한 77 K - 임계온도 사이의 저항을 그림 2에 제시하였다. 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 저항이 감소하기 시작하는 108 K에서의 피복재의 저항은 12.8 mΩ/m이며, 피복재 저항이 온도변화에 따라 선형적으로 변화한다는 가정 하에 계산된 액체질소의 기화온도인 77 K에서의 피복재 저항은 8.67 mΩ/m로 계산되었다.

한편, 표 1에 제시된 고온초전도 선재에 295 A<sub>peak</sub>를 인가하여 전압-전류 특성을 측정하여 그림 3에 제시하였다. 인가 전류의 최대치가 임계전류의 약 5배에 해당하므로 고온초전도 선재는 임계전류를 완전히 초과한 상태이지만, 인가 전류가 시변하는 관계로 발열과 냉각을 주기적으로 반복하고 있어 선재는 플럭스 플로우 상태를 유지한다. 이에 따라 그림 5에서 고온초전도 선재는 약간의 한류 작용과 함께 선재에서 검출되는 전압이 전류 인가 시간에 따라 점차 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

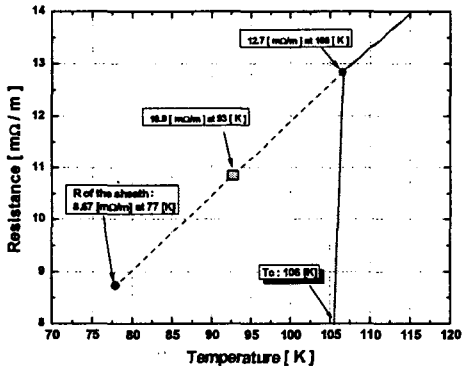


그림 2. 온도에 따른 고온초전도체 선재의 저항 변화

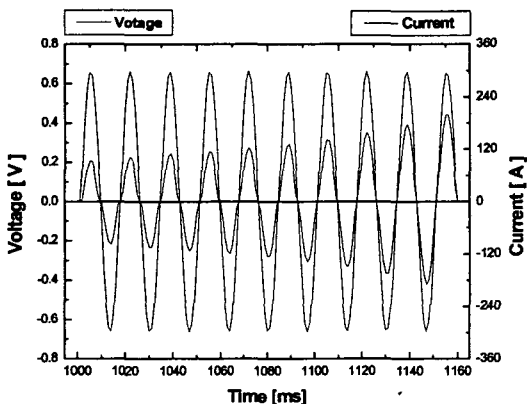


그림 3. 295 A<sub>peak</sub> 시 HTS 선재의 전압-전류 특성

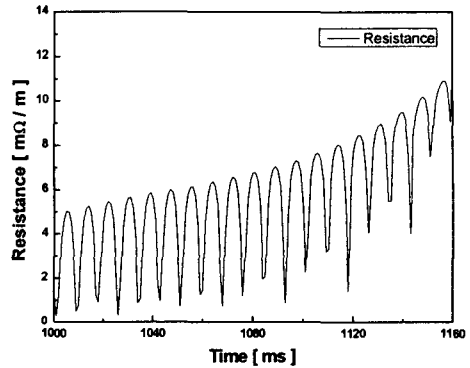


그림 4. 과전류 인가에 따른 HTS 선재의 저항 증가 (295 A<sub>peak</sub> 인가 시)

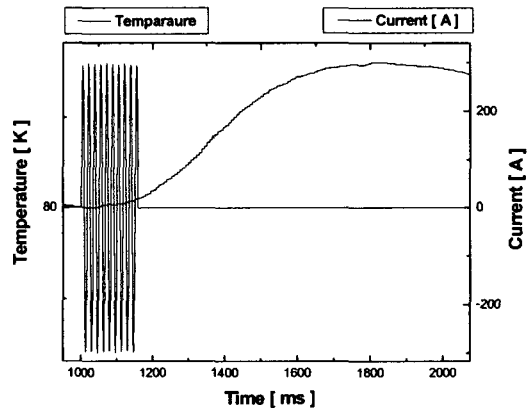


그림 5. 과전류 인가에 따른 HTS 선재의 온도 변화 (295 A<sub>peak</sub> 인가 시)

또한 전압-전류의 관계로부터 과전류 인가 시 발생하는 고온초전도 선재의 저항 증가를 그림 4에 나타내었다. 그림 4로부터 인가 시간이 경과함에 따라 저항은 9 주기 경과 이후 10.9 mΩ/m까지 증가하였음을 알 수 있다. 그림 2에 제시된 결과로부터 그림 4의 9주기 경과 시 발생한 최대 저항은 고온초전도 선재가 93 K일 때의 저항에 상응한다고 생각할 수 있다.

그림 5는 동일한 조건에서 열전대를 통해 검출된 고온초전도 선재의 온도 변화를 나타내고 있다. 그림에서 열전대가 검출한 초기온도는 80 K로서 액체 질소의 기화 온도인 77 K보다 높게 나타나고 있으나 이는 실험적 오차에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 시편이 완전히 단열되어 과전류 인가 시 발생한 줄열과 외부 온도와의 열교환이 일어나지 않았다고 가정하면, 그림 4에서 발생한 온도의 최대치는 16 K에 해당한다. 즉, 과전류에 의해 발생한 고온초전도 선재의 줄열은 16 K에 해당하며, 이때 선재의 온도는 93 K에 도달했음을 알 수 있다.

그림 4의 고온초전도 선재에서 발생한 저항으로부터 유추한 온도 결과와 비교할 때, 그림 5의 열전대에 의한 온도 측정 결과는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 전압-전류 특성을 측정하여 얻은 저항에 대한 결과가 실제 선재에서 발생한 온도와 거의 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 과전류 인가 시 발생한 선재의 줄열을 전압-전류 특성으로부터 예측할 수 있다고 판단할 수 있다.

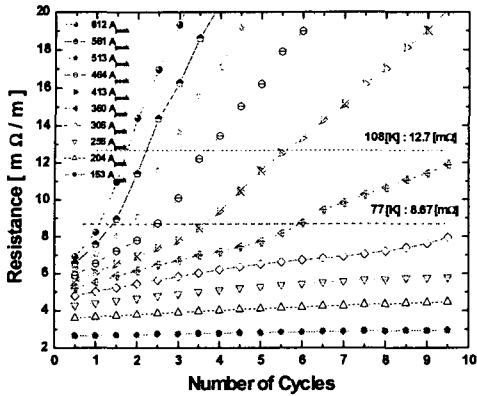


그림 6. 인가 전류의 크기 및 인가 시간에 따른 고온초전도 선재의 저항 증가

그림 6은 인가 전류의 크기와 인가 시간에 따른 고온초전도 선재의 저항 증가를 나타내고 있다. 그림 5의 결과로부터 360 Apeak를 인가하여 6주기를 경과한 경우, 발생한 줄열에 의하여 액체 질소는 증가하기 시작하며 약 10 주기가 경과하였을 때, 임계온도에 도달하여 선재가 손상될 가능성이 존재한다고 판단할 수 있다.

한편, 그림 6로부터 얻은 저항 증가에 대한 결과를 이용하여 과전류 인가 시 발생하는 줄열이 액체 질소의 기화열인 77 K를 초과하는 경우와 임계온도인 106 K를 초과하는 경우에 대해 근사식을 얻었으며, 근사식에 따라 표시된 인가전류의 크기와 시간에 따른 온도 변화 관계를 그림 7에 제시하였다. 그림으로부터 고온초전도 선재에 과전류가 인가되었을 때, 발생할 수 있는 플럭스 플로우 상태, 초전도-상전도 혼합 상태 그리고 상전도 상태로의 전이 영역을 판단할 수 있을 것으로 사료된다.

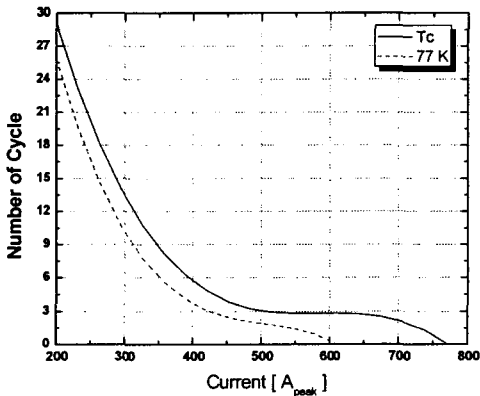


그림 7. 인가 전류의 크기와 인가 시간에 따른 고온초전도 선재의 온도 변화 근사치

#### 4. 결 론

임계전류 57 A, 임계온도 106 K의 Bi-2223 선재를 이용하여, 임계전류를 초과하는 과전류를 초전도체에 인가했을 때, 과전류에 의한 고온초전도 선재의 전압-전류 특성과 저항 증가를 얻었으며 이를 통해 인가 전류와 줄열 발생의 관계에 대해 조사하였다. 초전도 선재의 상온으로부터 임계온도까지의 선재저항을 측정할 결과, 108 K에서 저항은 12.7 mΩ/m이었으며 이로부터 계산한 77 K에서의 피복재의 저항은 8.67 mΩ/m로 나타났다.

초전도 선재에 295 Apeak를 9 주기 동안 인가하여 발생한 저항 증가와 줄열을 비교한 결과, 10.9 mΩ/m와 93 K로 일치하는 결과를 보였으며, 이로부터 과전류 인가 시 고온초전도 선재의 전압-전류 특성으로부터 발생된 줄열을 유추할 수 있을 것으로 판단되었다. 한편, 인가 전류의 크기 및 인가 시간에 따라 얻은 고온초전도 선재의 저항 발생으로부터 줄열이 액화 질소를 기화시키는 온도인 77 K와 임계온도인 106 K를 예측할 수 있었다.

본 연구 결과는 향후 고온초전도 선재로 구성된 전력기기의 사고 전류에 대한 보호를 연구하기 위한 기초자료로써 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 전력산업 기반기금과 21세기 프론티어 사업인 차세대 초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Stavrev, B. Dutoit and C. Friend, "Response of Bi-2223 taped to over-critical current excursions", Physica C, 339, pp.69-74, 2000
- [2] H. Shiizu, Y. Yokomizu, T. Matsumura and N. Murayama, "Proposal of flux flow resistance type fault current limiter using Bi-2223 high Tc superconductivity", IEEE Trans. on Appl. supercond., Vol.12, No. 1, March, 2002
- [3] O. Tsukamoto, J. Ogawa, M.Ciszek, D.Miyagi, I.Okzaki, Y.Niidome and S.Fukui, "Origins of errors in AC transport current loss measurements of HTS tapes and methods to suppress errors", IEEE Trans. on Appl. supercond., Vol.11, No.1, 2001
- [4] H.Shimizu, Y.Yokomizu, M.Goto, T.Matsumura and N.Murayama, "A study on required volume of superconducting element for flux flow resistance type fault current limiter", Applied Superconductivity Conference 2002, Houston, TX, USA
- [5] 임성우, 최용선, 황시들, 한병성, "과전류 인가 시 고온초전도 선재의 전류 분배에 따른 쉐치 특성", Progress in superconductivity, Vol. 4 No. 2, pp. 184-188, 2003