

## Quench characteristics of HTS tapes applied over -current

Seong Woo Yim<sup>\*,a</sup>, Yong Sun Choi<sup>a</sup>, Si Dole Hwang<sup>a</sup>, Byoung Sung Han<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Advanced energy & Tech. Group, Korea Electric Research Institute, Taejon, Korea

<sup>b</sup> Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Chonju, Korea

Received 20 August 2002

## 과전류 인가 시 고온초전도 선재의 켄치 특성

임성우<sup>\*,a</sup>, 최용선<sup>a</sup>, 황시돌<sup>a</sup>, 한병성<sup>b</sup>

### Abstract

Voltage-current characteristics of High Temperature Superconductor(HTS) tapes after applying the current beyond their critical current was investigated. When over-current is applied, the current begins to flow through the metal sheath instead of superconductor. The HTS tapes quenched were analyzed using  $V-I$  curve with various magnitudes of current. Two kinds of tapes were compared with each other to examine the influence of critical current on quench development. As a result, it was found that the resistance of superconductors and joule heat due to the over-current affect current distribution in HTS tapes. Critical current of HTS tapes was considered as a main factor deciding over-current characteristics.

*Keywords* : HTS tapes, over-current, quench development, current distribution, critical current

### I. 서론

고온초전도 케이블, 변압기와 같은 초전도 전력기기는 고 임계특성을 갖는 고온초전도 선재를 이용하여 제작된다. 그러나 고온초전도 선재는 기계적 강도가 취약하고 인가 전류의 크기 뿐 아니라 자장, 온도 등의 외적 요인에도 상당한 의존성을 보이기 때문에 그 임계특성을 규정하기 위해서는 물성 및 전자기적인 세부적 연구를 필요로 한다.

고온초전도체는 초전도-상전도 전이 시 혼합상태가 넓게 분포한다. 특히 고온초전도 선재의 경우, 피복재로써 우수한 전도체인 은 합금

을 사용하므로 과전류에 의한 손상 등에 대해 안정적인 장점을 갖고 있다. 그렇지만 선재의 통전전류를 결정하고 기기 설계 시 과전류에 의한 기기 보호를 위해서는 고온초전도 선재의 켄치 특성에 대한 명확한 분석이 요구된다. [1]-[3]

고온초전도 선재에 임계전류를 초과하는 과전류가 인가되면 저항이 생겨 줄열이 발생한다. 이때 과전류 인가 시간에 따른 선재의 소비 전력과 줄열에 의한 온도 변화와의 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

( $v$ : 선재의 체적,  $C_p$ : 비열)

특히 임계전류를 초과하는 교류 과전류가

\*Corresponding author. Tel : +82 -042-865-7835  
e-mail : yimsw@hanmail.net

인가되는 경우, 선재는 냉각과 발열을 주기적으로 반복하게 된다. 그러나 인가 전류가 커져 발생된 줄열이 충분히 냉각되지 못하는 경우에 열은 축적되며, 만약 인가 시간이 지속되면 초전도체는 마침내 열적 켄치에 도달하여 초전도성을 회복할 수 없게 된다.

위와 같은 과전류에 의한 켄치 특성을 분석하기 위해 본 연구에서는 고온초전도 선재에 임계전류 이상의 과전류를 인가하여 통전 특성을 조사하였다. 교류용 전력기기 응용을 고려하여 최고치가 임계전류를 초과하는 교류를 인가하여 인가 전류 크기 및 시간에 따른 전압-전류 특성 변화를 조사하였다. 또한 과전류 인가에 의한 저항 발생 변화를 조사하여 선재의 임계전류가 과전류 특성에 미치는 영향을 알아보았다.

## II. 실험방법

임계전류가 서로 다른 두 종류의 고온초전도 선재가 실험에 사용되었으며 각각의 임계특성이 Table 1에 제시되었다. 선재 전체 길이는

Table 1. Properties of HTS tapes

|   | Sample A            | Sample B           |
|---|---------------------|--------------------|
| Critical current [A, $\mu\text{V}/\text{cm}$ , 77K] | 57                  | 35                 |
| Critical temperature [K]                            | 105                 | 105                |
| Dimension [ $\text{mm}^2$ ]                         | $3.81 \times 0.193$ | $3.77 \times 0.35$ |

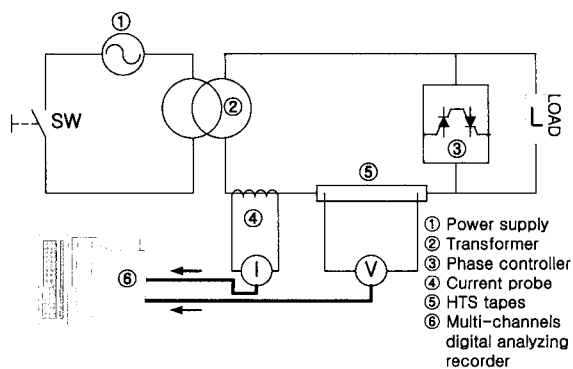


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up

120cm, 전압 단자 간격은 100cm로 설정하여 선재 표면에 부착하여 측정하였다.

Table 1에 제시된 선재에 교류를 인가하여 켄치에 의한 선재의 전압-전류 특성을 조사하였다. Fig. 1에 나타낸 실험 장치를 이용하여 인가 전류를  $50A_{\text{peak}}$  단위로 단계적으로 증가시키며 전류-전압 신호를 검출하였다. 켄치 진행 과정을 알아보기 위해 60Hz의 교류를 100ms (6주기) 동안 인가하여 과형을 측정하고 데이터를 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### A. 과전류 인가 시 전압-전류 통전 특성

샘플 A에 대해  $150A_{\text{peak}}$ 를 인가하여 측정된 전류-전압 특성이 Fig. 2에 나타나 있다. 측정 결과, 첫 주기의 최고치에서 387mV의 전압이 검출되었으며 100ms (6주기)의 시간이 경과하였을 때, 검출 전압이 417mV이 되어 30mV 만큼 증가하였다. 또한 인가 전류가 임계전류를 초과하지 않는 영역에서 초전도 영역이 비교적 안정적으로 존재하고 있는 것으로 보아 100ms의 전류 인가 시간 동안, 켄치에 의한 줄열 축적이 거의 없이 켄치 및 초전도 회복의 반복 과정이 지속되고 있다고 판단된다.

동일한 시편에  $254A_{\text{peak}}$ 를 통전 시켰을 때의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2의 결과와 비교하여 검출된 전압이 보다 빠르게 증가하고

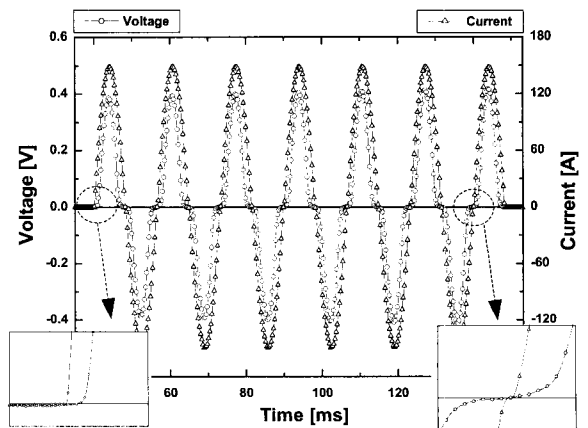


Fig. 2.  $V$ - $I$  characteristics of sample A when  $150A_{\text{peak}}$  was applied

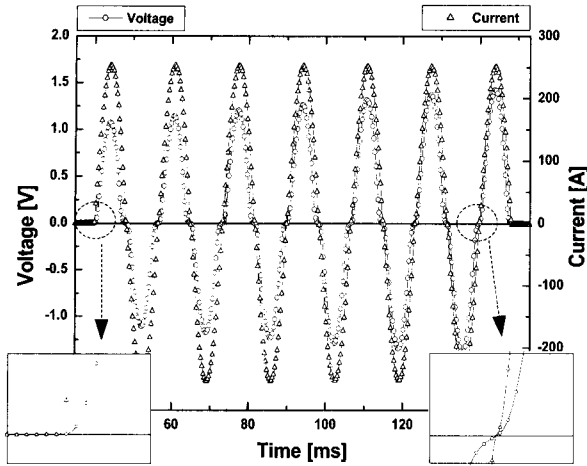


Fig. 3.  $V$ - $I$  characteristics of sample A when  $254A_{peak}$  was applied

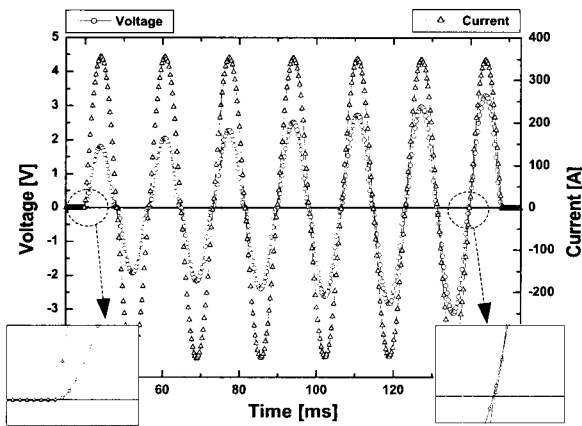


Fig. 4.  $V$ - $I$  characteristics of sample A when  $356A_{peak}$  was applied

있으며 6주기가 진행되었을 때, 첫주기에 비해 약 360mV가 증가하였다. 초전도체와 은 피복재의 저항에 의해 발생된 줄열이 완전히 냉각되지 못하여 점차 축적되고 있으며 인가시간이 지속되면 열적 켄치에 이를 것으로 판단된다. 그러나 6주기까지의 상태만을 고려할 때, 초전도 영역이 존재하고 있어 열적 켄치에 도달하지는 않았다고 판단된다.

한편 샘플 인가 전류의 크기를 더욱 증가시켜 최고치가 임계전류의 약 6배에 해당하는  $356A_{peak}$ 를 인가한 경우, Fig. 4와 같은 전압-전류 특성을 보였다. 검출 전압은 더욱 빠르게

증가하고 있으며 첫주기와 6주기 사이 최고치의 전압차는 1.1V에 이르고 있다. 또한 첫주기와 달리 6주기에 이르렀을 때 초전도 영역이 거의 존재하지 않아 필라멘트 내부의 초전도체가 열적 켄치에 이르렀다고 판단된다.

**B. 켄치 시 저항 증가와 임계전류의 관계**

고온초전도 선재에 임계전류를 초과하는 과전류가 인가되는 경우, 선재 내부의 초전도체가 상전도체로 전이되면서 저항이 발생된다. 이 경우, 초전도성을 완전히 잃은 상태라 가정하면 고온초전도 선재는 Fig. 5와 같은 등가 회로와 식으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 초전도성을 잃은 초전도체의 저항은 은의 저항에 비하여 100배 이상 큰 것으로 알려져 있다.[4] 따라서 임계전류를 초과하는 전류는 은 피복재를 통하여 흐르게 되며 선재의 임계전류는 선재의 저항 증가에 영향을 미친다는 것을 예상할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{Ag} &= V_{sup} \\ I_{tot} &= i_{Ag} + i_{sup} \\ R_{tot} &= R_{Ag} \times R_{sup} / R_{Ag} + R_{sup} \end{aligned} \tag{2}$$

임계전류가 저항 발생에 미치는 영향을 실험적으로 확인하고자 샘플 A에 비해 임계전류가 낮은 샘플 B에 과전류를 통전하여 그 특성을 상호 비교하였다.

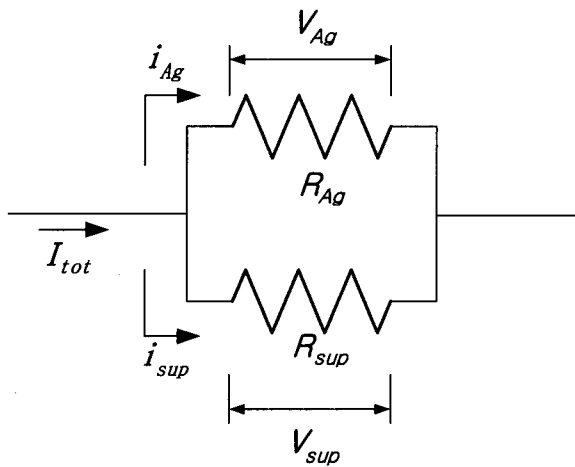


Fig. 5. Equivalent circuit and equation of HTS tape applied over-current

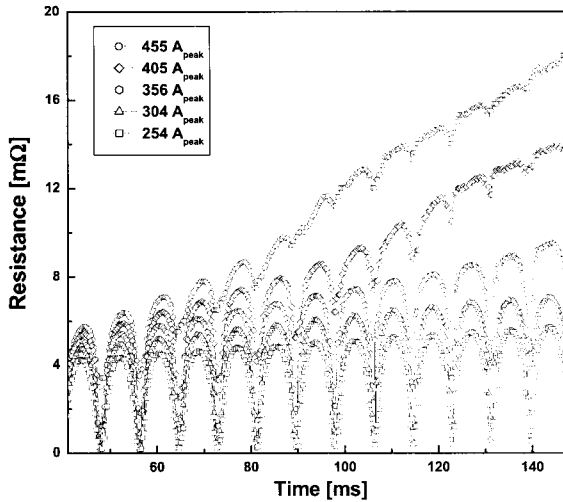


Fig. 6. Resistance occurrence of HTS tapes (sample A) with the magnitude of the applied current

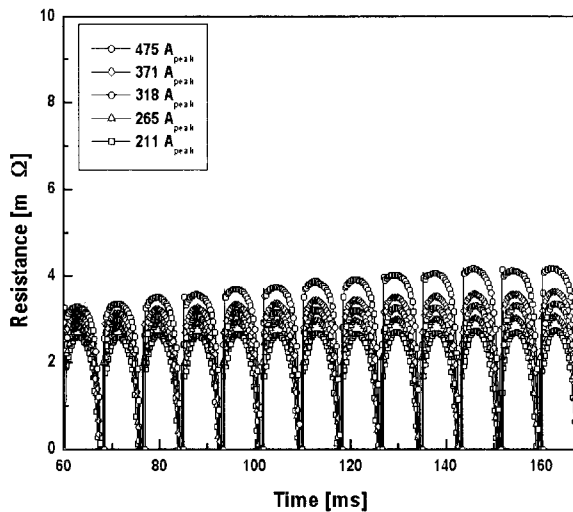


Fig. 7. Resistance occurrence of HTS tapes (sample B) with the magnitude of the applied current

Fig. 6과 7은 각각 인가 전류와 검출 전압의 관계로부터 얻은 샘플 A와 B에 대한 과전류 인가시간에 따른 저항 변화를 나타내고 있다. 과전류 인가 후 100ms 동안 선재 저항은 인가 전류의 크기에 비례하여 증가하고 있다. 특히, 샘플 A에 455A<sub>peak</sub>를 인가한 경우(Fig. 6), 100ms가 경과하는 동안 선재의 저항은 약 12mΩ이 증가하였다. 한편 샘플 B의 저항 발생은 샘플 A에 비하여 매우 서서히 증가하고 있음을 알

수 있다.(Fig. 7) 첫 주기에서는 두 샘플에 발생된 저항이 근소한 차이를 보이지만 100ms가 경과하였을 때 샘플 B의 저항은 1mΩ 이하로 증가하여 샘플 A와 상당히 다른 양상을 보이고 있다.

Fig. 5의 증가회로를 통해 알 수 있는 바와 같이 임계전류가 낮은 샘플 B의 경우, 인가 전류의 크기가 임계전류를 초과하는 순간, 초전도체를 대신하여 피복재로 통과하는 전류의 양이 샘플 A에 비하여 많아지므로 발생된 저항의 크기가 작으며 초전도체에 의해 발생된 주울 열이 작으므로 결과적으로 전류 인가 시간에 따른 선재 전체의 저항 증가가 작아졌다고 판단된다.

#### IV. 결론

임계전류가 다른 두 종류의 고온초전도 선재를 이용하여 과전류 통전 실험을 행하여 그 특성을 분석하였다. 임계전류가 57A인 고온초전도 선재의 경우, 150A<sub>peak</sub> 인가 시 켄치 후 초전도 회복 과정이 안정적으로 반복되었고, 254A<sub>peak</sub> 인가 시 전체 저항이 증가하기 시작하였다. 또한 356A<sub>peak</sub>에서는 전류 인가 후 100ms가 경과하였을 때, 초전도 영역은 존재하지 않고 열적 켄치에 이르렀다. 한편 임계전류 35A의 선재를 이용하여 실험결과를 비교한 결과, 같은 크기의 과전류 통전 시, 선재에서 발생되는 저항 크기가 임계전류가 높은 선재와 비교하여 증가율에 있어 상당한 차이를 보였다. 이로부터 인가 전류가 임계전류를 초과하는 순간, 선재 내부의 초전도체와 피복재간 전류 분류 과정에서 발생하는 줄열의 냉각 여부가 인가 시간 경과에 따른 저항(또는 검출 전압) 발생에 영향을 미친다는 결론을 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대초전도응용 기술 개발 사업단과 전력산업 기반 기금의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

**References**

- [1] Yu. A. Ilyin, V. S. Sysotsky, T. Kiss, M. Takeo, H. Okamoto, F. Ire, "Stability and quench development study in small HTSC magnet", *Cryogenics*, vol. 41, pp. 665-674, 2001.
- [2] V. S. Sysotsky, Yu. A. Ilyin, A.L. Rakhmanov and M. Takeo, "Quench development analysis in HTSC coils by use of universal scaling theory", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 11, No. 1, pp. 1824-1827, Mar. 2001.
- [3] N. nanato, M. Yanagishita and K. Makamura, "Quench detection of Bi-2223 HTS coil by partial active power detecting method", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 11, No. 1, pp. 2391-2393, Mar. 2001.
- [4] Svetloir Stavrev, Bertrand Dutoit, Chris Friend, "Response of Bi-2223 tapes to over-critical current excursions", *Physica C*, 339, pp. 69-74, 2000.