

과전류 인가 시 고온초전도 선재의 전류 분배에 따른 켄치 거동

임성우*, 최용선*, 심정욱*, 황시돌*, 오제명*, 한병성**
 *한전전력연구원 신기술 센터, **전북대학교 전자정보공학부

Quench development of HTS tapes applied over current with current distribution

Seong Woo Yim*, Yong Sun Choi*, Jung Wook Sim*, Si Dole Hwang*, Je Myoung Oh*,
 Byoung Sung Han**

Korea Electric Power Research Institute, Advanced Technical Center
 Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University.

Abstract - Quench characteristics of HTS tapes, which are applied over-current, were investigated. When the applied current exceeds the critical current of HTS tapes, the superconductor of HTS tape comes to be changed into normal conductor so that the current begins to flow through the metal sheath, which is made of good electrical conductor. In this study, the current, corresponds to 10 times I_c , was fed to HTS tapes. Using the $V-I$ curves and resistance with temperature variation of HTS tapes, the distribution of the applied current between superconductor and metal sheath was analyzed. As the results, we could acquire the duration and magnitude of current to reach to thermal quench.

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 선재로 유입되는 인가 전류가 임계전류를 초과하게 되면 전류는 피복재와 초전도체로 분배되며 그 분배 비율은 초전도체와 피복재 간 저항에 따라 결정된다.

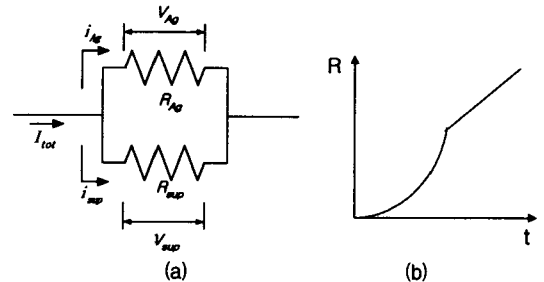


그림 1. (a) 과전류 인가 시 HTS 선재의 등가회로 (b) 전류 인가 시간에 따른 저항 증가

1. 서 론

고온초전도 선재에 교류를 통전시킬 경우, 직류 통전 시와는 달리 여러 가지 문제점들이 존재한다. 우선, 인가 전류가 임계전류보다 낮아 초전도성을 완전히 유지하고 있는 상태라 할지라도 히스테리시스 현상에 의한 저항성 교류 손실을 고려하여야 한다.[1] 또한, 인가 전류의 최대치가 임계전류에 근접하게 되면, 플럭스 크립 또는 플로우에 의한 손실이 추가적으로 발생한다.[2]

만약, 인가 전류가 임계전류를 완전히 초과하는 경우라면 선재 내부 코어를 이루고 있는 초전도체가 상전도체로 변화되면서 전류는 양질의 도전체로 구성된 피복재를 통하여 흐르게 된다. 이 때, 전류가 시간에 따라 변화하므로 선재는 초전도체 켄치에 의해 발생하는 줄열에 의한 발열과 주위를 둘러싸고 있는 액체질소에 의한 냉각을 반복한다. 이러한 이유로 인가 전류의 크기와 인가 시간에 의존하여 교류 인가 시 고온초전도 선재의 켄치 특성이 결정된다.[3]

본 연구에서는 고온초전도 선재의 과전류(임계전류를 훨씬 초과하는) 인가에 의한 켄치 특성을 파악하기 위하여 임계전류의 약 10배에 해당하는 과전류를 인가한 후, 전압-전류 특성을 조사하였다. 이를 위해 분말 충전법으로 제작된 선재를 시험하였으며 인가 시 전류 크기에 따른 선재의 저항 발생을 조사하였다. 또한 이 때 발생하는 선재 내부의 전류 분배를 분석하였으며, 최종적으로 얻어진 결과를 통하여 고온초전도 선재가 열적 켄치에 이르기 위한 전류의 크기와 인가 시간을 예측하고자 하였다.

2. 과전류 인가 시 고온초전도 선재의 켄치 특성

초전도체와 피복재로 구성된 고온초전도 선재에 인가된 전류가 임계전류를 초과하는 경우, 그림 1(a)와 같은 등가 회로로 표현될 수 있다.

또한 인가 전류가 임계전류를 초과하면서 선재 내부의 초전도체에서 발생한 줄열은 전류 인가 시간에 따라 점차 축적된다. 줄열이 축적되어 선재의 온도가 임계온도를 초과하게 되면 초전도체는 완전히 상전도체로 전이되며, 초전도체의 저항은 피복재에 비해 100배 이상 상승한다. [4] 이에 따라, 임계온도를 초과한 고온초전도체에 인가된 전류는 모두 피복재를 통하여 흐른다고 가정할 수 있다. 즉, 전류 인가 시간에 따른 고온초전도 선재의 저항 증가는 그림 1(b)와 같이 변화한다.

3. 실험 및 결과

과전류 통전 시험을 위해 사용된 고온초전도 선재의 특성은 표 1에 제시된 바와 같다. 표 1의 선재에 6주기 동안 전류를 인가하여 저항 발생에 의한 전압을 검출하였다. 측정 시 전압 단자 간 간격은 100cm로 설정하였으며, 선재와 전압 단자 간 형성되는 단면적을 최소로 하여 전압 검출 시 유도 전압 성분을 무시할 수 있는 범위로 낮추었다. 또한 전류 단자와 접촉 저항에 발생하는 열 유입에 의한 영향을 제거하기 위하여 전압 단자로부터 전류 단자와의 거리를 5cm 이상 되도록 유지하였다.

표 1. HTS 선재의 특성

임계전류	57 A [$\mu\text{V}/\text{cm}$ at 77K, 0T]
임계온도	106 [K]
폭×두께	3.81×0.193 [mm^2]

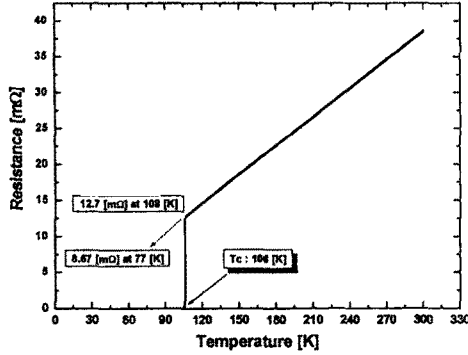


그림 2. 온도에 따른 고온초전도체 선재(100cm)의 저항 변화

임계전류를 초과하는 경우, 고온초전도 선재의 초전도체로부터 피복재로 분류되는 전류에 대해 조사하기 위해 상온으로부터 임계온도까지의 온도 변화에 따른 고온초전도 선재의 저항을 측정하였다. 전압 단자 간격을 고려하여 100cm의 선재에 대한 저항을 측정하였으며 그 결과를 그림 2에 제시하였다. 그림에서 초전도/상전도 경계에서 저항이 감소하기 시작하는 108K에서의 피복재 유효저항은 12.7mΩ/m이며, 피복재 저항이 온도 변화에 따라 선형적으로 변화한다는 가정 하에 계산된 액체질소의 기화온도인 77K에서의 피복재 저항은 8.67mΩ/m이었다. 고온초전도 선재에 최대치 150A의 과전류를 인가하였을 경우의 전압-전류 특성을 그림 3에 나타내었다.

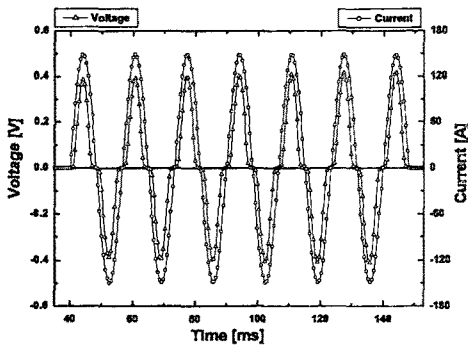


그림 3. 과전류 인가 시 HTS 선재의 전압-전류 특성 (150 A_{peak} 인가)

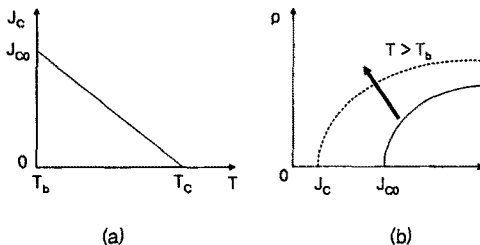


그림 4. (a) 온도에 따른 임계전류 변화 (b) 과전류 인가 시 임계전류 변화에 따른 저항 변화

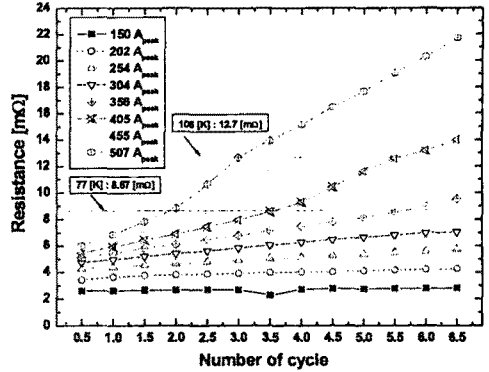


그림 5. 인가 전류 크기 및 시간에 따른 고온초전도 선재의 저항 증가

인가 전류가 임계전류를 초과하므로 매 주기마다 상전도체로 전이된 초전도체에서 줄열 발생과 냉각을 반복한다. 그러나 6주기가 경과할 때까지 전압 증가는 30mV 이하로 거의 증가하지 않고 있으므로 인가 시간에 관계없이 줄열이 완전히 냉각되고 있다고 판단할 수 있다. 그림 3의 결과와 달리, 인가전류의 크기가 증가하여 줄열이 완전히 냉각되지 못하고 축적된다면 각 주기에서 고온초전도 선재의 임계전류가 감소하게 되며 결국, 전체 선재의 저항 증가를 초래한다. 그림 5에 제시된 온도와 임계전류 및 저항과의 관계로부터 이를 설명할 수 있다.[5]

인가 전류의 크기를 약 50A 씩 증가시켜 507A_{peak}까지의 전압-전류 곡선을 얻었으며 다시 이를 저항 변화로 계산하여 그림 5에 나타내었다. 그림 2로부터 얻어진 온도에 따른 선재의 피복재 저항 변화를 고려할 때, 304 A_{peak}의 전류를 6주기 동안 인가하였을 때까지 선재의 온도는 77K를 초과하지 않은 것으로 판단된다. 그러나 통전 전류를 증가시켜 368A_{peak}를 인가한 경우, 5.5주기에 이르렀을 때 피복재 저항이 8.67mΩ(77K에서의 피복재 저항)을 초과한다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 시점 이후, 축적된 열이 액체 질소의 기화온도 이상으로 증가하고 있다고 판단할 수 있다. 또한 406A_{peak}를 인가한 경우, 역시 5.5주기가 경과한 시점에서의 저항은 약 12.7mΩ으로 나타났고 보다 높은 크기의 전류를 인가하였을 때, 그 시간은 점차 빨라지고 있다.

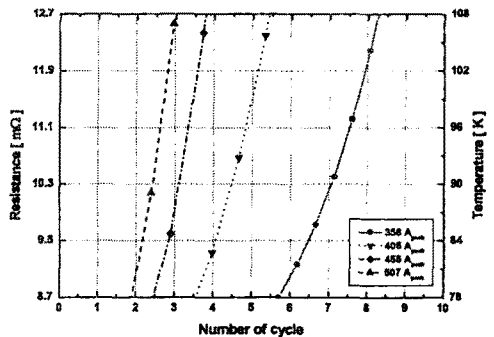


그림 6. 액체질소 기화온도로부터 임계온도 사이의 고온초전도 선재의 과전류 인가에 따른 저항 변화

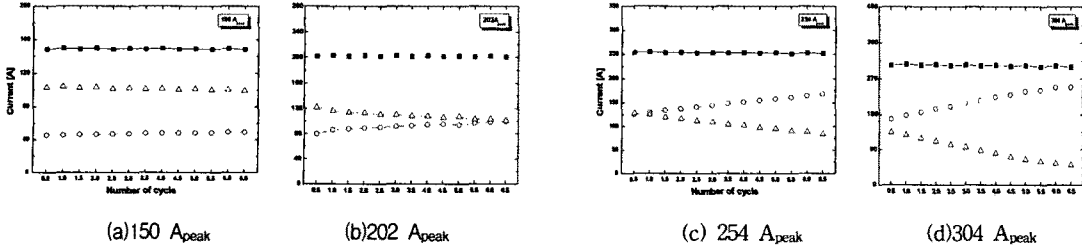


그림 7. 인가 전류 크기 및 시간에 따른 고온초전도 선재 내부의 초전도체-피복재 간 전류 분배
(-■- : 전체 인가 전류, -△- : 초전도체 분배 전류, -○- : 피복재 분배 전류)

108K에서의 피복재 저항이 12.7mΩ임을 감안하면 이 경계를 초과할 경우, 선재는 초전도성을 완전히 상실하며 인가 전류는 모두 피복재를 통하여 흐르게 된다고 판단할 수 있다. 그림 4에 제시된 77K로부터 108K 사이의 영역의 데이터를 이용하여 304A_{peak} 이상의 전류를 인가하였을 때 고온초전도 선재의 인가 시간에 따른 저항 변화에 대한 데이터를 근사화하여 식을 유도하였으며 그 결과를 그림 6에 제시하였다. 그림 6으로부터 임의의 인가 전류의 크기 및 인가 시간에 대한 저항 변화를 예측할 수 있다. 한편, 인가전류가 임계전류를 초과할 때 고온초전도 선재의 등가 식은 그림 1(a)에 제시된 등가회로로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{Ag} &= V_{sup} \\
 I_{tot} &= i_{Ag} + i_{sup} \quad (1) \\
 R_{tot} &= R_{Ag} \parallel R_{sup} / R_{Ag} + R_{sup}
 \end{aligned}$$

그림 4에서 측정된 줄열이 77K를 넘지 않아 피복재의 저항 변화가 없는 영역, 즉, 304A_{peak} 이하의 전류를 인가하여 얻은 데이터를 식 (1)에 적용하여 전류 통전 시 선재 내부 초전도체와 피복재 간 전류 분배를 분석하여 그림 7에 제시하였다. 150A_{peak}를 인가한 그림(a)의 경우, 인가 전류의 최고치가 임계전류의 약 3배에 이르고 있지만 전체 전류의 2/3 이상이 여전히 초전도체로 흐르고 있음을 알 수 있다. 따라서 선재에 발생하는 줄열은 크지 않으며 발생된 열은 액체 질소에 의해 완전히 냉각되어진다고 판단된다. 202A_{peak}를 인가하였을 때(b), 인가 시간이 경과함에 따라 전류 분배 비율이 점차 변화하고 있으며 6주기 경과 후에는 각각 50%의 비율로 통전되고 있다. 254A_{peak}의 전류를 인가하였을 때(c), 첫 주기에서부터 초전도체로 흐르는 전류보다 피복재로 통과하는 전류량이 더 많으며 시간에 따라 그 차이가 더욱 증가하고 있다. 304A_{peak}를 인가한 그림(d)의 경우, 6주기가 경과하였을 때, 거의 모든 전류가 피복재를 통하여 흐르게 된다. 결과적으로, 그림 5의 설명에서 언급한 바와 같이 이보다 전류의 크기를 더욱 증가시킬 경우에는 피복재로 완전히 통전되는 시간이 점차 빨라질 것이라는 것을 예측할 수 있다.

3. 결 론

임계전류를 초과하는 과전류를 인가하였을 때, 고온초전도 선재에 나타나는 켄치 특성을 조사하였다. 분말 충전법으로 제작된 임계전류 57A, 임계온도 106K의 고온초전도 선재를 시험하였다. 이 선재에 대해 상온으로부터 임계온도까지의 선재 저항을 측정 한 결과, 108K에서 저항은 12.7mΩ이었으며 이로부터 계산한 77K에서의 피복재의 저항은 8.67mΩ이었다. 이 선재에 150A_{peak}로부터 약 50A 씩 증가하여 507A_{peak}까지의 전류를 6주기 동안 인가시키며 전압-전류 특성을 조사하였다.

얻어진 전압-전류 특성에 대한 결과를 이용하여 전류 인가 시간 및 크기에 따른 고온초전도 선재의 저항 증가를 조사하였으며 이를 선재의 피복재 저항과 비교하여 측정되는 줄열과의 관계를 분석하였다. 그 결과, 304A_{peak} 이하의 전류를 인가하였을 경우, 6주기 이내에 선재의 온도는 77K를 초과하지 않았다. 그러나 368A_{peak} 인가 시 5.5주기에서 77K를 초과하였으며 406A_{peak}를 인가하였을 때, 같은 주기에서 임계온도인 106K를 초과하는 결과를 보였다. 또한, 과전류 인가 시 선재 내부에서 이루어지는 초전도체-피복재 간 전류 분배 현상을 분석하였다. 인가 전류 증가와 인가 시간의 경과에 따라 초전도체로 통전하는 전류보다 피복재로 통과하는 전류의 양이 점차 증가한다는 것을 알 수 있었다. 특히 150A_{peak}의 전류를 인가하였을 때, 전체 전류의 2/3 이상이 초전도체로 흐르며 304A_{peak} 시 6주기 후 전류는 완전히 피복재로 흐르게 된다는 결론을 얻었다.

본 연구를 통하여 얻은 결과는 향후 고온초전도 선재로 제작되는 기기의 켄치 특성, 특히 사고 전류에 대한 초전도 기기 보호 등의 연구에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단과 한전전력연구원의 전력사업 기반기금의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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 AS*, Vol.11, No. 1, pp. 2208-2211, March, 2001
- [2] H.Shiizu, Y.Yokomizu, T.Matsumura and N.Murayama, "Proposal of flux flow resistance type fault current limiter using Bi2223 high Tc superconducting bulk," *IEEE Trans. on AS*, Vol.12, No. 1, pp. 876-879, March, 2002
- [3] 임성우, 최용선, 황시돌, 한병성, "과전류 인가 시 고온초전도 선재의 켄치 특성", *Progress in Superconductivity*, Vol.4, No. 2, pp. 184-188, 2003
- [4] Svetloir Stavrev, Bertrand Dutoit, Chris Friend, "Response of Bi-2223 tapes to over-critical current excursions", *Physica C*, 339, pp.69-74, 2000
- [5] 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