

3차원 열특성해석을 통한 히터트리거 고온초전도 스위치의 설계

안민철* · 윤용수** · 김호민* · 김태중*** · 김영식* · 배덕권* · 이상진[§] · 한태수[§] · 고태국*
 연세대학교* · 안산공과대학** · 성남기능대학*** · 위덕대학교[§] · 기술표준원[§]

Design of Heater-trigger HTS Switch through 3-Dimensional Thermal Characteristic Analysis

Min Cheol Ahn* · Yong Soo Yoon** · Ho Min Kim* · Tae Joong Kim*** · Yeong Sik Kim* · Duck Kwon Bae* · Sang-Jin Lee[§] · Tae-Su Han[§] · Tae Kuk Ko*
 Yonsei Univ.* · Ansan College of Technology** · Sunnam Polytechnic College*** · Uiduk Univ.[§] · Agency for Tech. and Standards[§]

Abstract - This paper is about the characteristic analysis of a heater-trigger HTS switch. It is composed of a BSCCO tape wire and a heater as a thermal quench source. To minimize the heat flow to the liquid nitrogen, the epoxy was used around them. The heater-trigger switch operates in the process that the HTS tape is thermally quenched by the current flowing through the heater. Since the switch works in coolant, it needs to be designed by the accurate thermal characteristic analysis. Here, we focus on FEM for it.

1. 서 론

초전도 상태와 상전도 상태간의 상전이(quench/recovery)의 속도가 매우 빠르며, 초전도 상태에서 존재하지 않던 저항이 상전도 상태에서는 크게 나타나기 때문에 초전도체를 이용한 스위치는 꾸준히 연구되어 오고 있다. 그 중에서도 고온초전도 스위치는 고온초전도 영구전류스위치(PCS)나 고온초전도전원장치 등 초전도자석을 이용하는 응용기에 반드시 필요한 기술이다. 저온초전도체에 비해 높은 임계자장과 임계전류 밀도를 갖는 고온초전도체는 스위칭 역할로서 주로 히터 트리거 방식을 이용하게 된다. 그런데, 고온초전도체는 비열이 크기 때문에 켄치시키기 쉽지 않으며 그 동작이 극저온냉매 하에서 이루어지기 때문에 켄치특성에 관한 정확한 열특성해석이 중요하다.

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 고온초전도스위치의 켄치특성을 3차원 열특성해석으로 시뮬레이션하였다.

2. 본 론

2.1 모델링

유한요소법 시뮬레이션을 위하여 그림 1과 같은 3차원 모델을 설정하였다. 그림 1은 해석모델의 전체 모습이며, 유한요소법을 이용하여 mesh 작업을 수행한 모양이다. 그림 2는 그림 1에서 히터가 위치한 부분의 단면을 나타낸 것이다. 이는 BSCCO 테이프 선재 위에 히터를 직접 감고, 그 위에 단열을 위해 에폭시를 도포한 형태이다. 히터에 전류를 가하지 않은 초기 상태에서, 에폭시 외부의 온도는 액체질소의 온도인 77K로 설정하였다. BSCCO 테이프 선재에의 은비는 30%를 기준으로 모델링하였다.

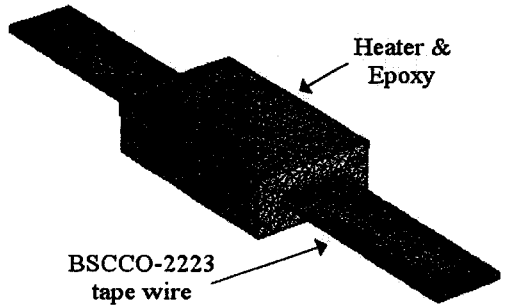


Fig 1. 3D model for analysis

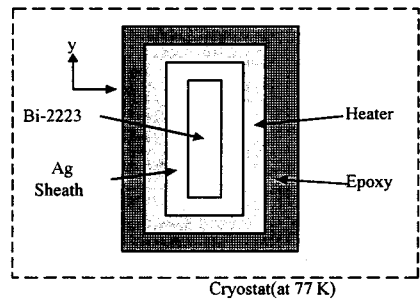


Fig 2 . Cross-section of model

2.2 시뮬레이션

설정된 모델을 해석하기 위해서 도입한 3차원 비정상 열전도방정식(1)(2)은 식(1)과 같다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q}(x, y, z) \quad (1)$$

여기에서 x,y,z는 직교좌표계, t는 시간, T는 온도, ρ는 밀도, k는 열전도도, q̇는 히터로부터의 열유입, C는 초전도체의 비열이다.

식(1)의 좌측 항은 히터, 에폭시 및 BSCCO의 재질의 밀도와 비열에 따른 열전도를 나타내며, 우측 항은 저장되는 내부의 에너지 밀도가 시간에 따라 변화하는 것을 보여준다. 한편 스위치와 질소사이에서 열의 대류

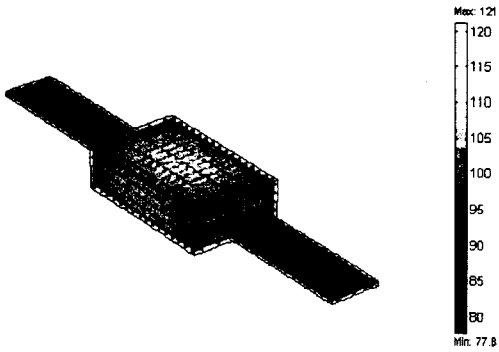


Fig 3. 3D simulation result with 0.63A heater current and 0.5mm epoxy thickness after 1sec

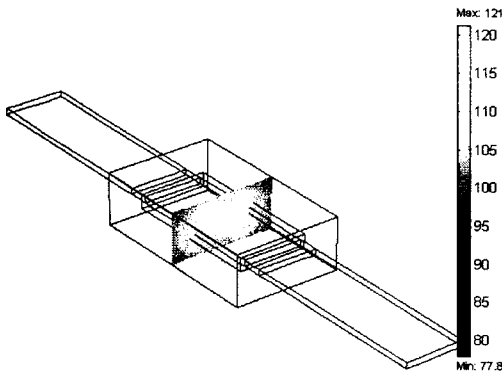


Fig 4. Simulation result on the center of switch with the same condition as Fig 3

가 발생한다. Neumann의 경계조건을 적용하면 액체질소로의 대류는 식(2)와 같이 정리된다[3].

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

여기서 q_{conv} 는 열전달율, h_c 는 대류열전달계수, A 는 단면적, T_s 는 표면의 온도이며 T_∞ 는 유체의 온도이다.

히터에 일정한 전류를 인가한 후 식(1)에 유한요소법을 도입하고 식(2)의 경계조건을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 컴퓨터시뮬레이션은 COMSOL사의 FEMLAB tool을 이용하였다.

2.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 1의 모델을 사용하여 3차원 열특성해석을 한 결과가 그림 3과 같다. 모델의 정 중심에서의 온도가 BSCCO 테이프의 임계온도인 120K을 넘게 되는 순간의 해석 결과이다. 이 때, 인가한 히터 전류는 0.63A이다. 히터전류가 그 이하인 경우는 온도분포가 120K을 충분히 넘지 못하게되어 켄치를 발생시키지 못한다. 그리고, 그림 3은 히터전류를 인가하고 난 뒤 1초가 지난 뒤의 열분포이다. 이 때, 선재의 양끝은 거의 77K을 유지하지만 히터를 위치시키고 에폭시를 바른 스위치 부분의 온도는 110K 이상으로 올라간 것을 볼 수 있다.

그림 3에서 보이는 부분은 에폭시의 맨 바깥쪽이기 때문에 안쪽 BSCCO 부분의 온도는 이 그림만으로는

알 수 없다. 이를 보여주는 것이 그림 4이다. 즉, 히터에 전류를 1초간 가했을 때의 정 중앙에서의 온도분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 가장 중심에서의 온도는 임계온도인 120K에 도달된다. 즉, 0.63A의 전류를 1초간 가하면, BSCCO가 켄치되기 시작하면서 이 고온초전도 스위치는 스위칭 동작을 하게 된다는 것을 알 수 있다.

그림 3, 4는 에폭시의 두께가 0.5mm인 경우의 해석결과이다. 에폭시는 히터와 액체질소 사이에서 단열의 역할을 하는데, 이 에폭시의 두께가 얇으면 그만큼 히터에서 발생한 열에너지가 액체질소로 많이 손실되면서 스위칭 역할을 하기 힘들어질 것이다. 그림 5는 에폭시의 두께를 0.3mm로 설정하여 히터전류 0.63A를 흘린 경우의 결과이다. 여기에서는 단열이 충분히 이루어지지 못하여서 온도가 120K이상의 올라가지 못하고 110K에 머무르는 것을 볼 수 있다.

그림 6는 그림 4처럼 스위치 중심에서의 단면에 있어서의 온도분포를 보여주는 결과이다. 히터전류가 인가된 후 2초가 지난 순간의 온도분포이다. 1초부터 중심의 온도가 120K을 넘기 시작하고 이 때에 BSCCO가 열적으로 켄치되기 시작하기 때문에 2초에는 약 126K의 충분한 온도를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이 그래프를 통해서, 액체질소 상에서 히터에 전류를 계속 인가하면 열에

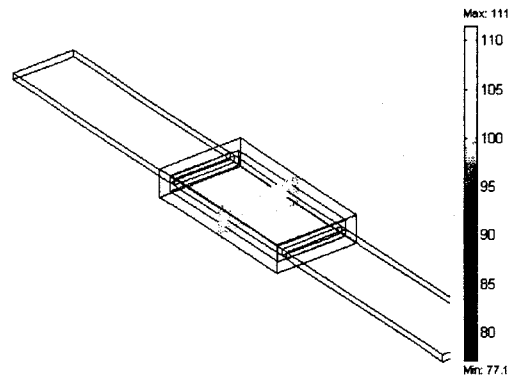


Fig 5. Simulation result on the center of switch with 0.63A heater current and 0.3mm epoxy thickness after 1sec

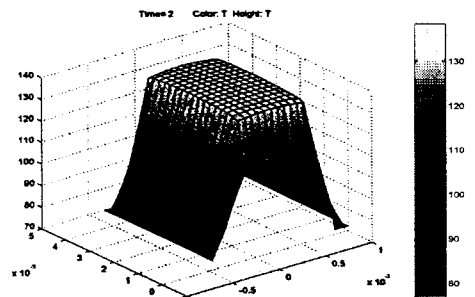


Fig 6. Temperature distribution in the center of switch with 0.63A heater current and 0.5mm epoxy thickness after 2sec

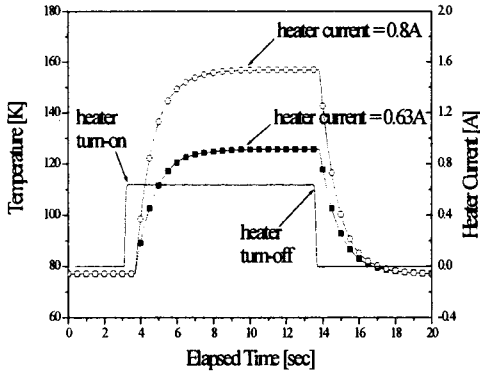


Fig 7. Simulation result considering various heater current with 0.5mm epoxy thickness

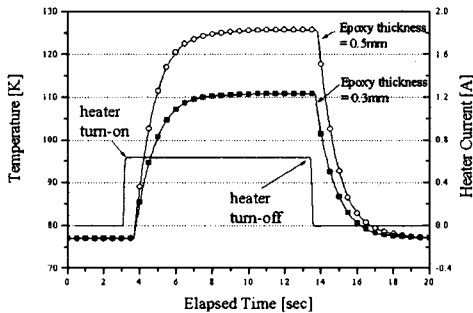


Fig 8. Simulation result considering various epoxy thickness with 0.63A heater current

너지는 차츰 축적되어 온도가 일정수준까지 올라간다는 것을 알 수 있다. 이는 히터를 곧바로 액체질소 상에 닿게 하지 않고 일정두께 이상의 에폭시로 단열을 시켜주었기 때문에 가능한 것이다.

그림 7는 히터전류 0.63A와 0.8A를 인가한 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 이는 초전도스위치의 중심에서의 온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그래프에서, 히터를 켜기 시작한 후 1초의 시간이 지난 후에 온도가 급격하게 증가함을 알 수 있다. 이는 히터에서 발생되는 열에너지가 축적되는데 걸리는 시간이 있음을 의미하게 된다. 그리고 히터에 전류를 계속 흘려도 온도가 계속 올라가는 것이 아니라 포화되게 된다. 이것은 히터를 통해 가해진 열량이 제한되어 있기 때문이다. 0.63A의 히터전류를 흘린 경우 126K에서 온도가 포화되고, 0.8A의 전류를 흘렸을 때는 156K까지 올라가서

포화된다. 이는 모두 에폭시의 두께를 0.5mm로 일정하게 유지한 경우의 비교이며 이 경우에 히터전류는 0.63A이상의 전류가 공급되면 스위치로서의 역할을 할 수 있다는 결과를 얻었다.

그림 8은 에폭시의 두께를 0.5mm와 0.3mm의 두 가지 경우로 설정하고 히터전류는 0.63A의 일정한 전류를 가하면서 시간에 따른 중심의 온도분포를 나타낸 그래프이다. 에폭시가 0.5mm의 경우는 126K에 도달하여 켄치를 발생시키지만, 0.3mm의 두께인 경우는 110K에서 온도가 포화되어, 중심의 BSCCO 테이프가 열적켄치를 일으키지 못한다는 것을 알 수 있다. 물론, 이 경우에도 히터전류를 높여주면 스위치로 작동할 수 있지만, 히터전류를 높여야만 한다는 것은 결과적으로 스위치의 효율은 좋지 않다는 것을 의미한다.

여기서는 스위치 부분에서의 충분한 열적켄치를 확인할 수 있는 용량 중에 최소라 할 수 있는 부분의 예를 들어 설명하였다. 즉, 시뮬레이션을 통하여 살펴본 결과, 에폭시의 두께를 0.5mm로 하여 단열을 시킨 상태에서 약 0.63A의 히터전류를 1초 이상 흘리게 되면 스위치의 정 중심에서의 BSCCO테이프가 열적켄치되기 시작한다는 결과를 얻었다.

3. 결 론

본 논문에서는 히터트리거 고온초전도스위치를 설계하기 위해서 유한요소법을 이용하여 3차원으로 열특성을 해석하였다. BSCCO 테이프 선재 위에 히터를 감고 그 위에 에폭시를 칠한 방법으로 모델을 설정하여 3차원 해석한 결과, 0.5mm두께의 에폭시를 도포한 모델의 경우 0.63A의 전류를 인가하여야 BSCCO 부분으로 임계 온도 이상의 온도가 전도되어 갈 수 있다는 것을 알았다. 그리고, 히터에 전류를 인가한 지 약 1초가 지나야만 열적켄치를 일으킨다는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과를 이용하여, 히터트리거 고온초전도스위치를 설계하고 제작할 수 있다. 이러한 시뮬레이션에 의한 결과는 앞으로 많은 고온초전도 응용기기에 사용될 고온초전도스위치의 설계 시 응용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 및 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. F. Mills, Heat Transfer, Richard D. Irwin Inc., Boston, pp.123-220, 1992
- [2] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, Conduction of heat in solids, Clarendon Press, Oxford, 1959
- [3] S. V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation, pp.41-77, 1980