

## 히터트리거에 의한 고온초전도 스위치의 특성해석

김 한준, 주민석, 임 도현, 고태국  
연세대학교 전기공학과

### The Characteristic Analysis of High-Tc Switch Using Heater Trigger

Hanjoon Kim, Min-Seok Joo, Do-Hyon Yim, Tae-Kuk Ko  
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

#### 1. 서론

고온초전도체는 임계온도 이외에도 여러가지 성질이 종래의 금속초전도체와는 다르다는 것이 알려져 있다. 특히 유리한 점은 고온초전도체로써 전체 혹은 일부 시스템을 운영할 경우 액체헬륨 대신 액체질소가 냉매로 쓰이게 되기 때문에 저온초전도 시스템과 비교해 볼때 전체적인 비용이 상당히 감소되는 것이다. 이러한 점 때문에 고온초전도체의 응용은 많은 분야에서 시도되고 있으며 그중 가장 빨리 실용화될 수 있고 기본적인 것으로는 초전도 스위치가 있다. 스위치는 원하는 조건에서 on-off 동작을 수행하는 것인데, 초전도 상태에서 상전도 상태로 혹은 상전도 상태에서 초전도 상태로의 상전이를 스위칭 동작에 이용하는 것이다. 히터트리거에 의하여 고온초전도체를 스위치로 이용하고자 할 때에는 히팅에 의한 켜치시간과 회복시간을 아는 것이 특성값 도출에서 대단히 중요하다. 즉, 한 지점에 히터선에 의하여 열을 발생시킬때 히터전류 및 히팅시간을 어느정도로 주어야 원하는 켜치타임을 얻을수 있는지, 그리고 각각의 전송전류에 따라 적당한 히팅전류와 히팅시간은 얼마나 되는지 아는 것은 실용화에 위한 꼭 필요한 요소이다.

#### 2. 스위치 모델

MPMG법을 이용하여 자체 제작된 YBCO계 벌크 초전도체에 열량을 주기 위하여 히터선이 감겨져 있다. 히터선이 가운데에 있을 경우 내부의 온도분포는 좌우대칭일 것이므로 모델에서는 한쪽 끝에 위치한 것으로 설정하여 해석할 수 있다. x 방향의 길이를 a, y방향의 길이를 b로하고 x=0에서 히터에 의해 열량이 침입한다고 생각한다.

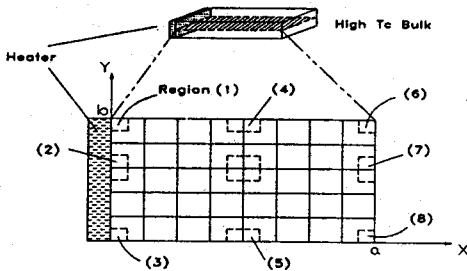


그림 1 고온초전도 스위치 모델과 내부평면

#### 3. 열평형방정식과 차분화

고온초전도 스위치의 켜치시간과 전파속도를 구하기 위하여 내부 평면에서의 온도분포를 알아내야 한다. 본 모델의 해석은 x,y의 두 방향을 고려한 2차원 해석이며, 액체질소에 의한 대류경계조건을 고려하였다. 미소체적에 대하여 내부에너지 증가율, 전도에 의한 이득률, 켜치발생 이후의 에너지발생율, 히터에 의한 발열, 대류에 의한 냉각 등을 모두 고려하여 2차원 열평형방정식을 유도할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + g + w$$

여기서 g는 켜치 이후 저항에 의한 발열항으로 단위체적의 온도 T가 임계온도 Tc보다 낮으면 0, Tc보다 높으면 전송전류에 의하여  $\rho J^2$ 만큼의 값을 갖는다.

w는 히터에 의한 발열항으로 히팅시간에 따라 시간 t가  $t < t_H$  이면  $I_H^2 R_H / A_H l_H$ 의 값을 가지며,  $t > t_H$  이면 0이 된다. 대류에 의한 냉각은 8개의 경계조건 중 표면에 위치한 7개의 영역에서 고려된다.

물질의 열확산율(thermal diffusivity)  $\alpha$ 를 도입하면 ( $\alpha = k / \rho C$ )

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + g' + w'$$

$$(g' = \frac{g}{k}, w' = \frac{w}{k})$$

FDM을 사용하여 열평형방정식을 차분화할 수 있다.

(1)  $0 \leq x \leq a$ 를 M개의 동일한 요소로 분할하면 요소의 크기는  $\Delta x = a/M$ 가 되고, 절점(node)의 수는 m=0에서 m=M까지의 (M+1)개가 된다. 대표점은 절점 m으로,  $x = m\Delta x$ 인 위치에 해당한다. 절점 m에서의 온도의 2차미분항을 차분식으로 표시하기 위하여 위치  $(m+1/2)$ 과  $(m-1/2)$ 을 고려하면,

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1/2,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}$$

2차미분항도 마찬가지로 유도할 수 있다.

$$(2) \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Big|_{m,n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n} - T_{m-1,n} + T_{m-2,n}}{\Delta x^2}$$

열평형방정식에 대입하여  $\Delta x = \Delta y$ 라고 가정하면

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1-4F_0)T_{m,n}^p + a\Delta t(g' + w')$$

단,  $F_0 = a\Delta t/(\Delta x)^2$

(3) 수치해석상의 안정화조건은

$$0 < F_0 \leq 1/4, \quad a\Delta t/(\Delta x)^2 \leq 1/4, \quad a\Delta t \leq (\Delta x)^2/4$$

그러므로,  $\Delta t \leq (\Delta x)^2/4a$ 인 조건을 만족하면 된다.

#### 4. 시뮬레이션

평면의 내부절점과 액체질소에 의한 냉각을 고려한 8개의 경계조건을 나열하면 다음과 같다.

(1) 내부절점:

$$T_{m,n}^{p+1} = F_0(T_{m+1,n}^p + T_{m-1,n}^p + T_{m,n+1}^p + T_{m,n-1}^p) + (1-4F_0)T_{m,n}^p + g\Delta t/\rho C$$

(2) 경계조건

$$1. \quad T_{0,N}^{p+1} = 2F_0(T_{0,N-1}^p + T_{1,N}^p + B_i T_\infty) + (1-4F_0 - 2B_i F_0)T_{0,N}^p + \frac{2F_0}{kb} P_H + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$2. \quad T_{0,n}^{p+1} = F_0(T_{0,n+1}^p + T_{0,n-1}^p + 2T_{1,n}^p) + (1-4F_0)T_{0,n}^p + \frac{2F_0}{kb} P_H + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$3. \quad T_{0,0}^{p+1} = 2F_0(T_{0,1}^p + T_{1,0}^p) + (1-4F_0)T_{0,0}^p + \frac{2F_0}{kb} P_H + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$4. \quad T_{m,N}^{p+1} = F_0(T_{m+1,N}^p + T_{m-1,N}^p + 2T_{m,N-1}^p + 2B_i T_\infty) + (1-4F_0 - 2B_i F_0)T_{m,N}^p + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$5. \quad T_{m,0}^{p+1} = F_0(T_{m-1,0}^p + T_{m+1,0}^p + 2T_{m,1}^p) + (1-4F_0)T_{m,0}^p + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$6. \quad T_{M,N}^{p+1} = 2F_0(T_{M-1,N}^p + T_{M,N-1}^p + 2B_i T_\infty) + (1-4F_0 - 4B_i F_0)T_{M,N}^p + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$7. \quad T_{M,n}^{p+1} = F_0(2T_{M-1,n}^p + T_{M,n+1}^p + T_{M,n-1}^p + 2B_i T_\infty) + (1-4F_0 - 2B_i F_0)T_{M,n}^p + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

$$8. \quad T_{M,0}^{p+1} = 2F_0(T_{M-1,0}^p + T_{M,n+1}^p + B_i T_\infty) + (1-4F_0 - 2B_i F_0)T_{M,n}^p + \frac{\Delta t}{\rho C} \cdot g$$

- 차분식들에 나타나는  $(\Delta t/\rho C) \cdot g$ 는 Generation term으로서  $T_c$ 이하에서는 0이다.

- 경계 1,2,3에서는 히터에 의한 발열량  $(2F_0/kb) \cdot P_H$  이 존재하는데, 히터가 open되면 0이다. ( $K < t_H$ )

- 가로 6cm, 세로 1.5cm의 직사각형모양으로서 고온초전도벌크의 내부에 존재하는 평면이다.

- 시간간격  $\Delta t$ 는 0.2초로 잡았다.

## 5. 결과

(1) 전송전류에 따른 온도분포

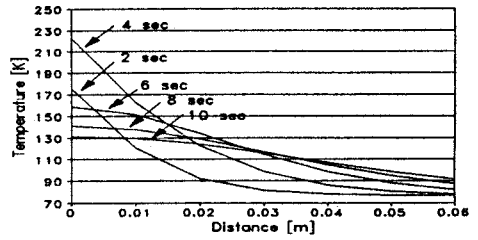


그림 2 전송전류 0.5A

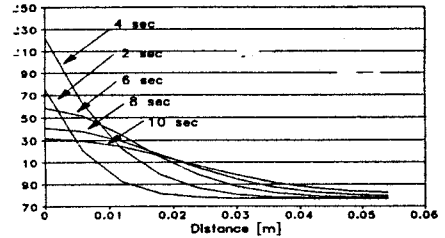


그림 3 전송전류 1A

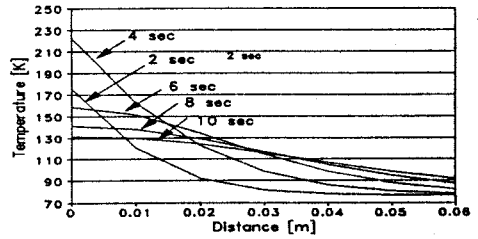


그림 4 전송전류 1.5A

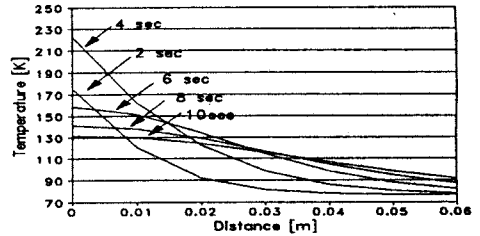


그림 5 전송전류 2A

(2) 히팅시간에 따른 온도분포

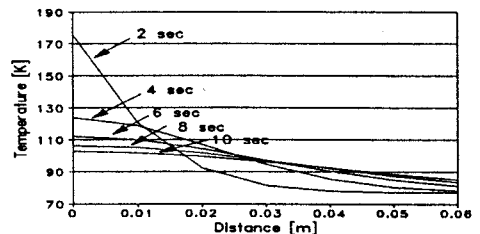


그림 6 히팅시간 2초

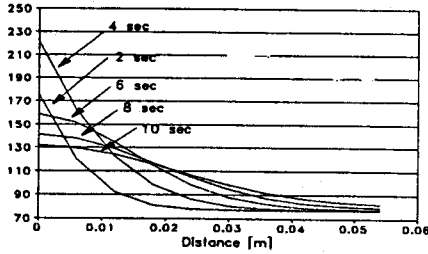


그림 7 히팅시간 4초

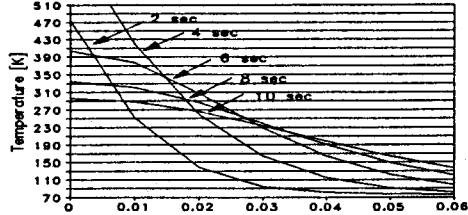


그림 12 히터전류 2A

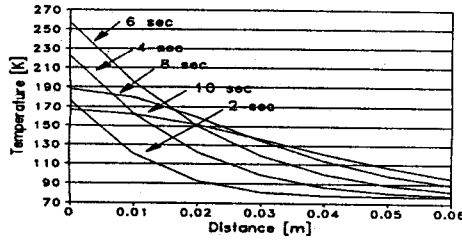


그림 8 히팅시간 6초

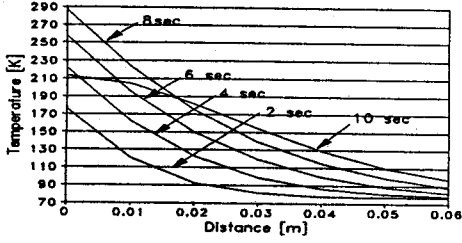


그림 9 히팅시간 8초

(3) 히터전류에 따른 온도분포

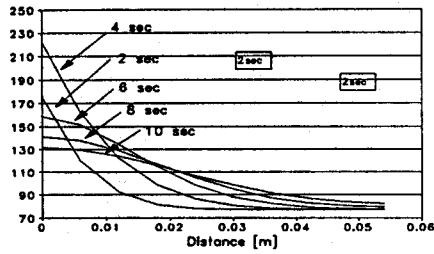


그림 10 히터전류 1A

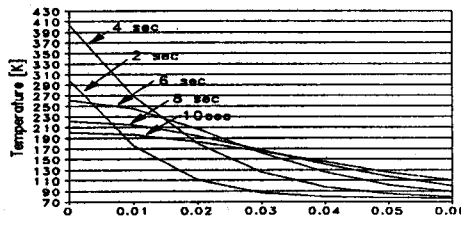


그림 11 히터전류 1.5A

6. 결론

시뮬레이션의 결과 고온초전도체의 국부히팅에 의한 완전퀠치는 전송전류 보다는 히터에너지에 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다. 전송전류, 히터전류, 히팅시간을 바꾸어가며 결과를 얻어보았는데 히터에너지의 급격한 증가가 빠른 퀠치시간을 얻는데 훨씬 유리함을 알 수 있었다. 그러나, 전파속도를 빠르게 하기 위해서 히터전류를 계속 증가시키는 것은 스위치가 지나치게 가열되기 때문에 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 적절하게 히터전류와 히팅시간을 조절하는 것이 필요하다.

응답시간 및 회복시간은 히터전류가 커지면 커질수록 퀠치되는 시간은 빨랐으나, 반면 회복시간이 늦어짐을 확인할 수 있었다. 히팅시간에 따라 응답과 회복시간이 바뀌는 것을 관찰할 수 있었다.

본 모델과 시뮬레이션에서 얻어진 내용은 앞으로 고온초전도체에 외부교란 에너지가 들어왔을때의 안정도 해석 및 고온초전도 스위치를 개발할때 초전도체에 타격을 주지않는 최소에너지 를 구하는데 이용될 수 있다. 온도분포와 전파속도 등 기초특성을 구하는 것은 고온초전도 응용기기의 제작의 기본자료로써 매우 유용하다.

7. 참고문헌

- [1] L.Dresner, "Propagation of Normal Zones in Composite Superconductors", Cryogenics, Nov., 1976, p.675
- [2] K.Ishibashi, M.Wake, and M.Kobayahi, "Propagation Velocity of Normal Zone in a SC Braid", Cryogenics, Aug., 1979, p.328
- [3] K.Yoda and M.Morita, "Minimum Quench Energy Measurement of NbTi wires using a Small Ceramic Heater", IEEE Trans.on Mag., Vol.27, No.2, March, 1988, p.1194
- [4] Yildiz Bayazitoglu, M.Necati Ozisik, <Elements of Heat Transfer>, McGraw-Hill, USA, 1988, p.145-175
- [5] 홍 준균, <열전도, 확산의 수치해석>, 반도체출판사, 1991, p.43-68