

YBCO 고온초전도링의 웜치현상해석

*주민석, 이찬주, 추용, 고태국
연세대학교 전기공학과

The analysis of quenching mechanism of a YBCO HTSC ring

*Minseok Joo, Chanju Lee, Yong Chu, Taekuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - An inductive high-T_c superconducting fault current limiter using YBCO superconducting ring in the secondary part has many advantages in power networks. It is based on the appearance of resistivity in the superconductors and this paper is studied on the relation between the resistivity and the temperature of superconductors. In many other devices using superconductors, it is important to prohibit the superconductors from quenching for the protection of the whole system, or at least the superconductors.

1. 서론

고온 초전도체는 저온 초전도체와 비교했을 때, 냉매를 액체질소를 이용한다는 것이 큰 장점이 되고 있다. 따라서, 저온 초전도체를 이용한 시스템보다 경제적인 측면에서 훨씬 유리하기 때문에, 많은 용융분야에서 연구가 진행중이다. 고온 초전도체가 발견된 이후 많은 분야에서 고온 초전도체를 이용하여 많은 기기들이 제작되기 시작했다. 초전도를 용융하는 전력기기로는 초전도 스위치, 초전도 사고전류제한기 등이 있는데, 이 기기들은 초전도체가 빨리 펜치되어 저항이 발생하는 성질을 이용한 기기들아므로, 초전도체의 저항 발생 메카니즘을 아는 것은 기기 제작에 있어서 중요한 일이 될 것이다. 그리고, 다른 용융기기들에서도 초전도체의 보호라는 측면에서, 그리고, 초전도를 이용한 기기 전부를 보호하는 측면에서 저항 발생의 메카니즘은 꼭 필요한 것이다. 저온 초전도체에서는 저항발생에 대한 많은 연구가 행해졌다[1]-[2]. 그리고, 고온 초전도체에서의 저항발생에 관한 연구도 꾸준히 진행중이다. 본 논문에서는 고온 초전도체의 비저항과 초전도체의 온도와의 함수관계를 이용하여 고온 초전도 사고전류제한기에 이용된 링 타입의 초전도체에 저항이 발생되는 과정을 시뮬레이션하여 그 타당성을 검증한다.

2. 시뮬레이션

2.1 차분화

초전도 링에서의 온도분포와 그 온도에 의한 저항을 구하기 위하여 FDM에 의한 차분화를 했다. 본 논문에서는 r, φ, z 세방향으로의 3차원해석을 시도했으며, 3차원 모델해석을 위한 열전달 방정식은 아래 식(1)과 같다[3].

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \lambda r \frac{\partial}{\partial \phi} \left(r \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q_s \quad \text{식 (1)}$$

위의 식(1)을 control volume법으로 차분화시키면 식(2)가 된다.

$$\begin{aligned} & \lambda A_{l-1} \frac{T_{l-1} - T_l}{\Delta r} + \lambda A_{l+1} \frac{T_{l+1} - T_l}{\Delta r} + \lambda A_{n-1} \frac{T_{n-1} - T_l}{r_l \Delta \phi} \\ & + \lambda A_{n+1} \frac{T_{n+1} - T_l}{r_l \Delta \phi} + \lambda A_{n-1} \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta z} \\ & + \lambda A_{n+1} \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta z} + V [q_s - C_v \Delta \frac{T}{\Delta t}] = 0 \end{aligned} \quad \text{식 (2)}$$

여기서,

λ : 열전달 계수

A : 링의 단면적

i : r 방향으로의 차분

m : ϕ 방향으로의 차분

n : z 방향으로의 차분

q_s : 차분된 부피 내부에서의 발열량

C_v : 정적 비열

이다.

초전도링은 질소안에 있기 때문에 질소와 닿아있는 면은 질소와 열교환이 이루어져 대류조건이 필요하다. 이런 질소와의 대류에 의한 경계조건을 8가지로 나타낼 수 있는데, 경계조건의 위치는 그림1과 같다.

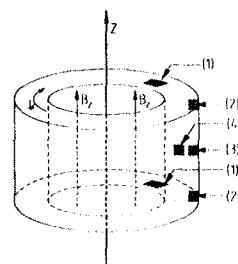


그림 1. 시뮬레이션 해석을 위한 초전도링 모델

그림 1에서 경계조건(1)의 FDM에 의한 차분식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} & \lambda A_{l-1} \frac{T_{l-1} - T_l}{\Delta r} + \lambda A_{l+1} \frac{T_{l+1} - T_l}{\Delta r} + \lambda A_{m-1} \frac{T_{m-1} - T_l}{r_l \Delta \phi} \\ & + \lambda A_{m+1} \frac{T_{m+1} - T_l}{r_l \Delta \phi} + h A_{n-1} (T_n - T_{n-1}) + \lambda A_{n+1} \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta z} \\ & + V [q_s - C_r \Delta \frac{T}{\Delta t}] = 0 \quad \text{식(3)} \end{aligned}$$

여기서,

h : 열대류계수

T_n : 액체질소의 온도 (K)

내부절점에서의 차분식은 식(2)과 같으며, 나머지 경계부분들의 차분식은 식(3)에서처럼 열대류계수를 도입함으로써 이끌어낼수 있다.

2.2 시뮬레이션에 이용된 파라미터

시뮬레이션에 이용된 초전도링은 YBCO계 초전도체로서 링의 제원 및 YBCO계 초전도체의 각종 물질상수값은 표1과 같다.

표1-1 링의 제원

링의 안쪽 반지름	2.775 [mm]
링의 바깥쪽 반지름	3.125 [mm]
링의 높이	3.50 [mm]

표 1-2 YBCO계 초전도체의 물질상수값[4]

T_c	90[K]	C_v (비열)	0.7 [$J/cm^3 \cdot K$]
T_m	77.3[K]	h (질소대류계수)	9000 [$J/m^3 \cdot K$]

2.3 온도와 저항과의 관계

모든 물질들처럼 초전도체도 온도가 증가함에 따라 저항도 증가하는 비례곡선을 따르지만, 초전도체는 다른 물질과는 조금 다른 모양을 갖는다. YBCO계 초전도체와 같은 2종 초전도체에서는 임계전류가 넘는 순간부터 저항이 발생하기 시작하는데, 그 때부터 초전도체에서 발열이 일어나면서 온도가 올라가기 시작한다. 따라서, 본 논문에서는 초전도링이 담겨져있는 액체질소의 온도 즉, 77.3K부터 저항이 발생하기 시작한다. 초전도체가 임계온도에 도달하면 그때부터는 초전도체는 완전히 정상상태로 되고 그후부터는 정상상태 저항을 갖게된다[5].

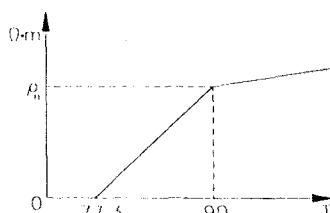


그림 2. YBCO링의 비저항과 온도와의 관계

여기서, ρ_n 은 $5.70 \times 10^{-10} [\Omega \cdot m]$ 이다.

2.4 weak region의 도입

초전도체가 제작될 때, 각종 결함에 의해 불균일한 초전도체가 생기기 마련인데, 결함이 있는 부분을 weak spot이라고 한다. weak spot은 다른 초전도체에 비해 낮은 임계온도, 낮은 임계전류, 작은 임계자기장을 갖게되므로, 다른 초전도체부분보다 쉽게 펜치가 나게된다. 전류제한기의 예를 들면, 사고가 나게되면 초전도링에 흐르는 전류가 급속히 커지게 되고, 임계전류를 넘는 전류가 흐를 때 초전도체가 펜치가 되면서 저항이 발생하게 되는데, weak spot에서는 다른 초전도부분보다 임계전류가 낮기 때문에, 먼저 저항이 발생하기 시작한다. 일단 weak spot이 생기면, 링에 흐르는 전류는 weak spot을 피하면서 흐르게 되고, 그렇게되면, 다른 부분의 전류밀도가 높아지게 된다. 즉, 전류가 흐르는 방향에 수직한 면의 전류밀도가 높아지므로 그 부분은 다른부분보다 훨씬 펜치가 된다. 이런 식으로 weak spot이 있는 한 단면이 펜치가 나가된다. 이런 이유가 본 논문에서 weak region을 도입한 배경이다.

2.5 프로그램 알고리즘

사고가 나기전에 정상적으로 작동을 하다가 어떤 시간에 부하 저항을 0으로 함으로써 사고를 낸다. 그때, 전류를 구하고, 그 전류가 임계전류를 넘어서면 weak region에 저항이 먼저 발생하게 된다. weak region의 초기저항은 상전도임대의 저항의 약 1/1000을 주었다. 그 저항과 전류에 의해 발열이 생기고, 그 발열량에 따라 초전도체에 발생하는 온도가 결정되고, 또 그 온도에 의해 온도와 저항과의 관계에 의해 각 절점에서의 저항값이 주어진다. 모든 절점에서의 저항을 계산해서 총 저항을 구하고 그 총저항값을 전류를 구하는 루틴으로 리턴시킨다. 그리고, 다시 발열량을 결정하는 루틴으로 들어간다. 이런 식으로 계속 반복하면서 저항이 일정해질 때까지 계속 반복한다.

3. 시뮬레이션 결과

온도의 그래프를 보면 온도가 시간에 따라 fluctuation하는 것을 알수 있는데, 이것은 전류가 줄어들되면서 내부의 발열량이 그 절점에서의 온도상승에 기여하는 양보다 작아지게되면, 내부온도가 증가하는 것보다 주위의 절점으로부터 열량을 뺏기기 때문에 온도가 줄어들게 된다. 그러면, 저항도 온도와 비례함수이므로 따라서 줄어들게 된다. 다시 전류가 증가하게 되면 내부온도가 증가하게되고 따라서 저항도 같이 증가하게 된다. 그리고 저항증가의 모습은 전류의 약 반주기로 증가와 감소를 거듭하게 된다.

3.1 weak region갯수에 따른 저항발생

그림 3-1, 3-2, 3-3에서 보면 weak region이 증가할수록 저항이 증가하는 것을 볼수 있으며, 저항은 계속 증가하는 것이 아니라 어느정도의 값을 가지면 더 이상 증가하지 않는 곡선을 가지게 된다. 이것은 초전도체에 더 이상 온도가 올라가지 않기 때문인데, 전류가 제한되면서 초전도체의 온도가 증가할만큼의 발열량을 갖지 못하기 때문이다.

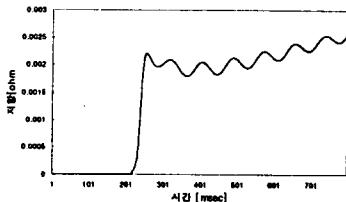


그림 3-1. weak region을 1개 도입했을 때 저항

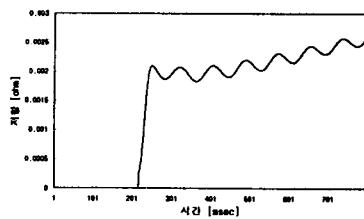


그림 3-2. weak region을 5개 도입했을 때 저항

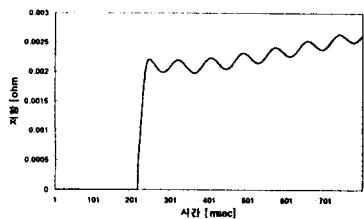


그림 3-3. weak region을 10개 도입했을 때 저항

3.2 weak region에서의 저항과 온도

저항은 온도에 의존하는 함수이기 때문에, 그림 3에서처럼 온도곡선과 저항곡선은 같은 모양을 가지게 된다. weak region이 많을수록 온도도 증가하게 된다.

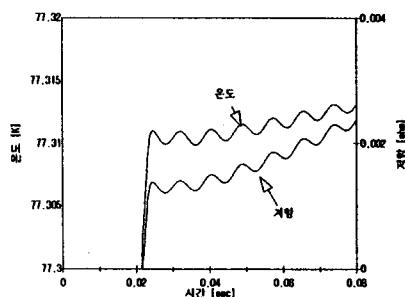


그림 3. weak region이 10개일 때의 저항과 온도

4. 결론

본 논문에서는 초전도체에서의 온도와 저항과의 함수관계를 도입해 고온 초전도한류가 시뮬레이션을 함으로써, 그 함수관계의 타당성을 검증하였다.

사고가 나면서 전류가 증가하게되고, 임계전류를 넘어서면서 저항이 발생하기 시작한다. 저항발생으로 전류는 줄어들면서 초전도체 시스템에 흐르는 전류가 제한된다. 저항은 계속 증가하는 것 이 아니라 어느 정도 증가하게되면 더 이상 증가하지는 않게 된다.

본 논문에서는 초전도체의 저항과 온도와의 관계만으로 시뮬레이션을 했지만, 초전도체에 영향을 주는 파라미터들로는 온도뿐 만이 아니라, 자장 및 전류등이 있다. 따라서, 앞으로는 저항이 온도에 관한 함수 만이 아닌 자장과 전류에도 의존하는 값으로 연구의 방향을 진행시켜야 할 것이다.

참고문헌

- [1] V.A.Altov et al., Stabilization of superconducting Magnetic Systems. Moscow, USSR: MIR, 1984, p.312
- [2] L. Dresner, "Superconducting Stability '90, a review," Cryogenics, vol.31, pp.489 - 498, July 1991.
- [3] 홍 준표, <열전도 확산의 수치 계산>, 반도출판사, 1991, pp. 43-68
- [4] T. P. Sheahen, <Introduction to High-Temperature Superconductivity>, Plenum Press, p.361
- [5] M. Victor, S. Vladmir, and B. Joachim, "Quenching in a High-Tc Superconducting Ring", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 5, pp.22-25, 1995