

과도전류 후의 고온초전도체 박막의 켄치/회복 특성

김진석, 박을주, 설승윤
전남대학교 자동차공학부

Quench and recovery characteristics of HTS film after fault current

J. S. Kim, E. J. Park, S. Y. Seol
School of Automotive Engineering, Chonnam National University

syseol@chonnam.ac.kr

Abstract - Quench and recovery process of high-temperature-superconductor(HTS) film deposited on the sapphire substrate is studied numerically. The quench is developed by fault current and the superconductivity is recovered by convection of heat into coolant. After the fault current, the HTS film experiences the quench state, current sharing state, and finally recovers the superconductivity. Numerical results of this study are compared to the previous experimental results, and shows that this numerical work can explain the mechanism of quench/recovery characteristics of HTS film.

1. 서론

저항형 초전도체 한류기의 특성 파악을 위한 많은 연구들 중 H.Y. Kim과 H.S. Choi[1]는 초전도 박막이 과도전류로 인해 켄치(quench)된 이후 냉각을 통해 다시 초전도성을 회복하는 과정을 실험하였다. 이 실험에서는 한류소자의 저항을 측정하고 있는데 시간에 따른 저항의 감소율이 초기에는 완만하다가 급격히 감소하여 초전도성을 회복하는 것을 발견하였다. 실험에서는 LaAlO_3 기판 위에 YBCO 박막을 성장시켜 제작하였으며, 박막의 불균일성으로 인한 hot spot의 열을 분산하기 위하여 금(Au) 박막을 YBCO 위에 증착하여 제작되었다.

본 논문에서는 위 실험에서 측정된 시간에 따른 저항의 변화를 이론적으로 규명하고 수치해석을 통해 실험결과를 모사하기 위함이다. 필름 단면에서의 온도 분포에 따른 초전도체 YBCO와 금(Au) 박막 사이의 전류분류를 고려하였고, 줄(Joule) 열 발생 메커니즘을 적용하였다. 수치해석은 유한차분법을 이용하여 수행하였으며, 하나의 단면이 전체를 대표한다고 보아 단면에서의 두께 방향에 따른 해석을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 전류분류

Fig. 1은 초전도체의 온도에 따른 임계전류밀도의 감소 양상을 나타내고 있다. 본 논문에서는 해석의 편의상 임계전류밀도가 선형적으로 감소한다고 가정한다[2, 3].

전류밀도비(J_r)는 임계전류밀도(J_{co})와 작동전류밀도(J_o)의 비이며 θ_{cs} 는 전류분류가 발생하는 무차원 온도를 의미한다.

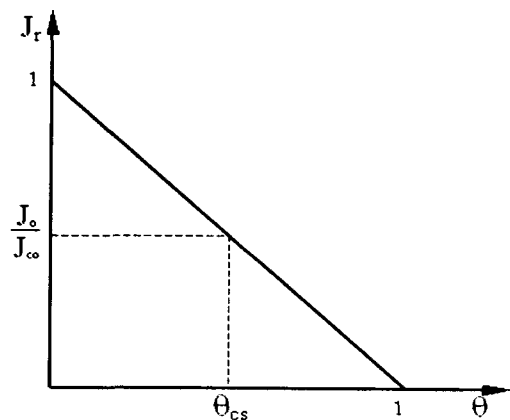


Fig. 1. Current density ratio as a function of dimensionless temperature

초전도체가 수용할 수 있는 임계전류를 넘어 서면 전류는 초전도체와 안정화재료인 금(Au)으로 분류되어 줄 열이 발생한다. 이러한 전류분류 정도를 계산하기 위하여 전류분류비(i_m)를 다음과 같이 정의한다[4, 5].

$$i_m = \frac{I_m}{I_o} = g\left(\frac{\phi - \theta_{co}}{1 - \theta_{co}}\right) \quad (1)$$

I_m 은 안정화 재료로 흐르는 전류이고, I_o 는 작동전류를 나타낸다. 식(1)에서의 함수 g 는 다음과 같이 정의되고

$$g(v) = \begin{cases} 0 & v < 0 \\ v & 0 \leq v \leq 1 \\ 1 & v > 1 \end{cases} \quad (2)$$

온도분포에 따른 함수 Ψ 는 다음과 같다.

$$\phi = \int_{\frac{(1-\lambda)}{\lambda}}^{\frac{1}{\lambda}} g(\theta) d\eta \quad (3)$$

전류분류비 $i_m=1$ 인 경우는 초전도체로는 전류가 흐르지 않고 안정화 재료로만 전류가 흐르게 되어 안정화 재료에서 줄 열이 발생한다. 과도전류가 흘러 초전도체가 완전 켜치되었다면 전류분류비가 1인 상태가 된다.

$0 < i_m < 1$ 이면 전류분류가 발생하여 초전도체와 안정화재료에서 동시에 줄 열이 발생한다. 그리고 $i_m=0$ 이면 초전도체가 모든 전류를 수용할 수 있어 안정한 상태를 유지하게 된다.

2. 2 이론적 배경

Fig. 2는 저항형 한류소자 Au/YBCO 박막의 두께 방향만을 고려한 모델을 개략적으로 보이고 있다. 두께 D 로 표시된 stabilizer는 금(Au) 박막을 의미하며 그 상부는 액체질소(LN₂)에 의해 냉각되고 있다. 초전도체의 두께는 d 이며, 사파이어(sapphire)는 d 나 D 에 비하여 무한히 두꺼운 것으로 간주하였다. Fig. 2의 오른쪽 기호는 해석에 사용되는 무차원 두께를 나타내었다.

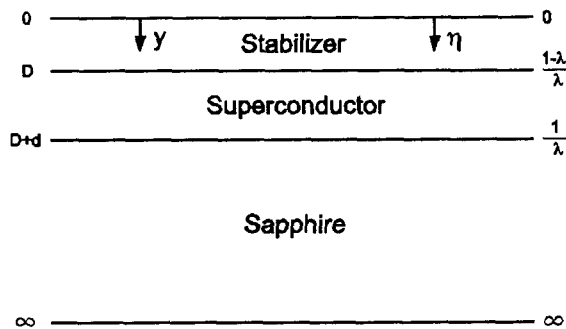


Fig. 2. Schematic of a Au/YBCO film

고온 초전도체의 온도 해석은 선행된 연구의 일차원 비정상상태 열전도방정식을 무차원으로 유도한 지배 방정식을 적용하였다[6].

Au/YBCO 박막에 과도전류가 흐르면 모든 전류는 일차적으로 Au로 흘러 Joule 열이 발생한다. 발생한 줄 열에 의해 Au의 온도가 ΔT 만큼 상승한다고 보았다. 따라서 금 박막의 저항과 열용량을 고려한 에너지 밸런스에 의해 금 박막의 온도상승 ΔT 를 계산하면 다음과 같다.

$$\Delta T = \frac{I_e^2 L^2 \rho_m \Delta t}{\gamma_m c_m} \quad (4)$$

위 식에서 I_e 는 과도전류이고 Δt 는 과도전류가 흐른 시간, 그리고 L 은 박막의 길이이다. ρ_m , γ_m , c_m 은 각각 Au의 전기 비저항, 밀도, 비열을 의미한다. 이러한 온도 상승을 초기 교란 에너지에 의한 온도 상승으로 취급하기 위하여 무차원 교란 에너지 ε 를 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta T}{T_c - T_o} = \frac{I_e^2 L^2 \rho_m \Delta t}{\gamma_m c_m (T_c - T_o)} \quad (5)$$

시간 Δt 동안 과도전류 I_e 가 흘러 안정화재료인 금 박막에서의 온도가 식 (5)와 같이 상승한 후 Au/YBCO 박막에는 정상 전류 I_o 가 흐른다. 정상 전류는 초전도체가 액체질소 온도에 있는 경우 임계전류 이하의 값이다. 하지만 과도전류 직후의 Au/YBCO 박막의 온도는 상승되어 있으므로 정상전류 하에서도 켜치나 전류분류를 일으킬 수 있고 냉각에 의해서 박막의 저항은 시간에 따라 제로가 된다.

이러한 회복 과정에서 박막의 전체저항 R 은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{V}{I_o} = \frac{\rho_m L}{A_m} i_m \quad (6)$$

식(6)에 Wiedemann-Franz law($\rho_m k_m = BT$)를 적용하면 식(7)과 같이 표현할 수 있다[7].

$$R = \frac{BTLi_m}{A_m k_m} \quad (7)$$

B 는 Wiedemann-Franz 상수, T 는 온도, k_m 은 안정화재료의 열전도도를 의미한다. 온도를 무차원화 하기 위하여 무차원 온도 $\theta = (T - T_o) / (T_c - T_o)$ 를 적용하여 무차원 저항(ε)을 식(8)과 같이 정의하였다.

$$\varepsilon = \frac{R}{BT_o L / k_m A_m} = i_m \left[1 + \theta \left(\frac{T_c}{T_o} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

3. 결 과

Au/YBCO 박막 내의 시간에 따른 온도분포 변화를 구하기 위하여 유한차분법을 이용하였다. 총 45개의 격자를 사용하였으며 초기 조건으로는 과도전류에 의해 식 (5)와 같이 온도가 상승되었다고 가정하였다. 액체질소로의 대류 열전달에 의한 냉각과 줄 열 발생에 따르는 초전도체의 켜치 후 회복 특성을 일차원적으로 해석하였다.

Fig. 3은 무차원 시간에 따른 무차원 온도분포 변화를 나타내었다. 금 박막의 초기온도가 $\theta = 2.25$ 인 경우 시간이 흐르면서 초전도체로의 전도와 냉각제로의 대류에 의해 온도가 내려가게 된다. YBCO 온

도 상승으로 초전도성을 잃어버리게 되면 모든 전류는 안정화 재료로 흐르게 되어 줄 열이 발생한다. 냉각제에 의해 온도가 내려가면서 초전도성을 회복하게 되면 전류분류가 발생하여 초전도체와 안정화 재료로 전류가 흐르게 되어 온도가 일정하게 서서히 감소해 가는 것을 보여주고 있다. 안정화 재료의 열전도도가 높기 때문에 안정화 재료의 전체의 온도는 거의 일정함을 볼 수 있다.

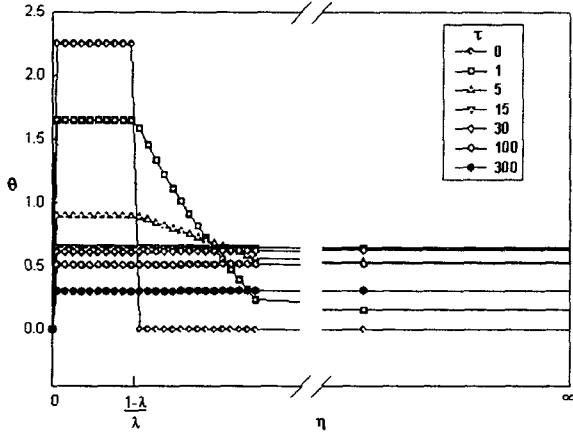
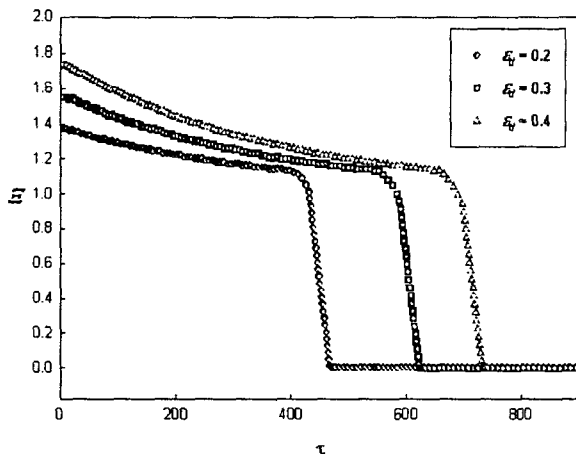


Fig. 3. Temperature profile with time

Fig. 4는 교란 에너지에 의한 Au/YBCO박막에 과도전류가 가해진 후 과도전류를 제거한 시점에서부터 식 (8)에 의한 무차원 저항을 무차원 시간에 대하여 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 여러 가지 초기 온도에 대한 초전도체가 켄치 후 회복 특성을 보여주고 있다. 저항은 초기에는 비교적 완만하게 감소하다가 동일한 저항에서 급격하게 감소하는 형상을 나타낸다. 회복곡선들은 저항이 제로에 도달하는 시간은 차이가 있으나 저항이 감소하는 유형은 교란에 상관없이 일정함을 알 수 있다. 저항의 변화가 급격하게 변화하는 부분의 저항값이 모두 동일하며, 감소하는 기울기가 비슷함을 보여준다.

Fig. 4(b)는 회복곡선들을 저항이 급격하게 변화하는 부분이 일치하도록 수평 이동한 그래프이다.

(a)



(b)

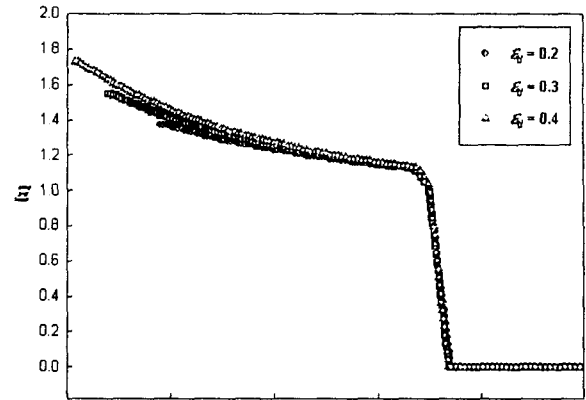


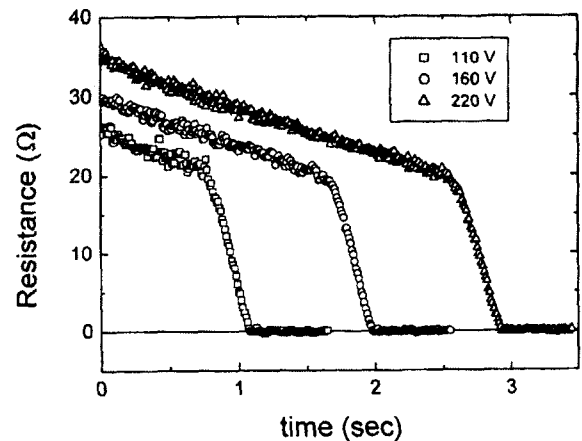
Fig. 4. (a) Resistance of superconductor film for selected disturbances after fault condition was removed. (b) Curves were translated to coincide the points at which resistance changes rapidly.

겹쳐진 회복곡선을 보면 초기에는 약간의 차이를 보이지만 모든 곡선들이 겹쳐지기 시작하여 저항 감소 기울기가 급격하게 변화한 후에는 거의 일치된 양상을 보인다.

회복곡선을 고찰하면 초기 저항이 완만하게 감소하는 구간은 완전 켄치상태임을 알 수 있다. 즉 모든 전류가 안정체(금 박막)로 흐르고 있어 금의 저항에 의해 전압차가 발생한다. 금의 저항은 Widemann-Frantz 법칙에 의해 온도의 영향을 받는다. 따라서 저항이 시간에 따라 감소하는 것은 금 박막의 온도가 감소하기 때문이다.

회복곡선 기울기가 급격하게 변하는 것은 금 박막으로만 흐르던 전류가 금과 YBCO로 분류되기 때문이다. 따라서 금 박막으로 흐르는 전류가 낮아지고 이에 따라 금에서의 Joule 열 발생 감소에 따라 온도도 낮아진다. 마지막으로 저항이 제로가 됨은 YBCO가 초전도성을 완전히 회복한 결과이다.

(a)



(b)

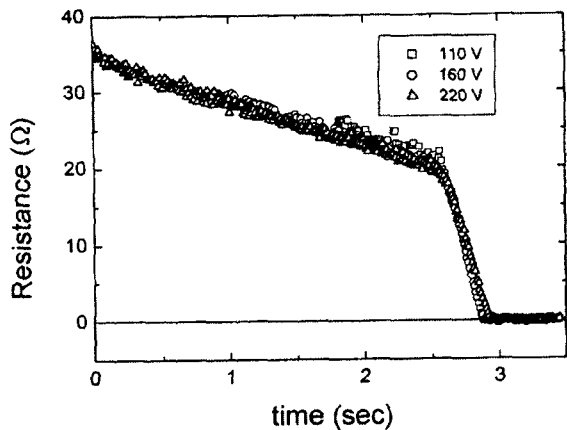


Fig. 5. Experimental results of super-conductor film resistance by experiment [Reference 1].

Fig. 5는 논문 [1]에서 발표한 실험 결과를 보여준다. 수치해석 결과인 Fig. 4와 실험결과인 Fig. 5를 비교하면 동일한 양상의 회복특성을 보여준다. 수치해석에서는 모든 특성치를 무차원화 하여 실험 결과와 수치적으로 비교할 수는 없으나 향후 정확한 물성치를 사용한다면 수치비교도 가능할 것으로 보인다.

4. 결 론

사파이어(sapphire) 기판에 증착된 Au/YBCO 필름에 과도전류가 흘러 켄치 된 후 다시 초전도성을 회복하는 과정을 무차원 열전도 방정식을 이용하여 해석하였다. 켄치 상태에서 회복하는 동안 저항은 상대적으로 완만하게 감소하다가 급격히 감소하여 제로가 된다. 완만하게 감소하는 동안은 모든 전류가 안정화재료인 금박막으로 흐르고 급격한 저항 감소구간은 초전도체와 안정화 금속(금) 사이에 전류분류가 발생하는 구간이다. 본 논문에서의 이론적 모델과 수치해석 결과는 기존의 논문에서 실험에 의하여 확인된 Au/YBCO 박막의 회복특성곡선을 모사할 수 있음을 보였다. 이 연구결과는 Au/YBCO 박막 한류소자의 켄치 회복 특성을 예측함으로써 한류소자의 설계 자료로 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000 - 00308 - 0(2002))지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 김혜림, 최효상, 임해용, 김인선, 현옥배, "Au/YBCO 박막 meander line의 켄치회복에 대한 분석", 2001년도 한국초전도학회, pp. 92-94.
- [2] 정신근, 설승윤, "고온 초전도체 테이프의 상전도 영역 전파 특성 해석", 한국초전도 저온 공학회 논문지, 3권.1호, pp.11-15, 2001.5
- [3] M.I. Flik, and C.L. Tien, "Intrinsic thermal stability of anisotropic thin-film superconductors", ASME J Heat Transfer, Vol.112, 1990.
- [4] J.P. Wu, and H.S. Chu, "Substrate effects on intrinsic thermal stability and quench recovery for thin-film superconductors", Cryogenics, Vol.36, pp.925-935, 1996.
- [5] S.Y. Seol, and M.C. Chyu, "Stability criterion for composite superconductor of large aspect ratio", Cryogenics, Vol.34, pp.513-519, 1994.
- [6] 김진석, 설승윤 "Au/YBCO 박막의 안정성 해석", 2002년도 한국초전도학회, pp. 245-248.
- [7] M.N.Wilson, " Superconducting Magnets ", Chapter 11, Clarendon Press, Oxford, 1983