

Au/YBCO 박막 meander line의 켄치회복에 대한 분석

김혜림, 최효상, 임해용*, 김인선*, 현옥배
한전 전력연구원, *한국표준과학연구원

Analysis on quench recovery of Au/YBCO thin film meander lines

Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi,
Hae-Ryong Lim*, In-Seon Kim*, and Ok-Bae Hyun
Korea Electric Power Research Institute,
*Korea Research Institute of Standards and Science

hrkim@kepri.re.kr

Abstract - We investigated quench recovery characteristics of Au/YBCO thin film meander lines. $YBa_2Cu_3O_7$ films were coated in-situ with a gold layer and patterned into 2 mm wide meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents at various source voltages. Resistance decreased first slowly and then rapidly to zero. Resistance vs. time curves for different source voltages fell on top of each other when translated horizontally. The slowly varying portion of data fell on straight lines of a slope on a semi-log scale at all source voltages. A heat balance equation reflecting heat loss from meander lines to surroundings explains these results quantitatively.

1. 서 론

저항형 초전도 한류기는 구조와 원리가 간단하여 소형화할 수 있는 장점이 있어 독일의 Siemens AG 그룹[1,2], 영국의 EA[3] 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 초전도 한류기를 연구개발하는 데에 있어서 켄치 특성에 관한 연구가 필요한데 켄치 특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 이 때문에 저온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구[4-6]는 많이 되어 있지 않다. 켄치 특성 중 켄치 상태에서 초전도 상태로의 회복 특성은 더욱 중요한데 이는 과도전류가 더 이상 흐르지 않을 때 초전도 한류기가 정상운전상태로 돌아가는 속도를 결정하기 때문이다.

본 연구의 목적은 고온초전도 한류소자의 켄치상태로부터의 회복 특성을 조사하여 고온초전도 한류소자의 설계에 자료로 활용하는데 있다.

이를 위하여 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막으로 폭 2 mm 길이 42 cm의 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자를 제작하여 회복특성을 측정하고 측정 결과를 한류소자에서 주위로의 열 손실 개념을 반영한 열균형 방정식을 사용하여 정량적으로 설명하였다.

2. 실 험

저항형 초전도 한류소자를 직경 2 인치 두께 0.3 μm 의 YBCO 박막을 사용하여 제작하였다. YBCO 박막은 sapphire 기판 위에 성장된 것으로 독일 Theva사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 3 MA/cm²이었다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하는 성질이 있는데 이를 막기 위하여 YBCO 박막 성장 직후 in-situ로 0.2 μm 두께의 금 박막을 증착하도록 하였다. 금박막은 제조공정 특성상 생기는 YBCO의 불균일성으로 인한 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시키거나 우회시키는 역할을 하기도 한다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 14개의 stripe으로 구성된 폭 2 mm 길이 42 cm의 meander line으로 구성된 초전도 한류소자를 제작하였다. 한류소자 pattern은 아래 Fig.1과 같다(흰 부분이 식각되는 부분).

Au/YBCO meander line형 한류소자를 이용하여 켄치회복특성 측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 Fig.2와 같다. V_0 는 전원전압, R_0 는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항, Au/YBCO는 초전도 한류소자이다. 스위치 S_1 을 닫아 과도전류는 발생시켜 켄치를 유도하였으며, 차단기가 보통 5 주기에 작동하는 점을 고려하여 5~8 주기에 스위치 S_2 를 오픈으로 켜 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 과도전류의 크기는 전원전압을 변화시켜 조절하였다. 스위치가 SCR로 구

성되어 있어 off 상태에서도 작은 전류가 회로에 흐르는 것을 이용하여 한류소자의 저항을 측정하는 방법으로 퀘치회복특성을 측정하였다. 측정시 신호와 잡음의 비를 높이기 위하여 low pass filter를 사용하여 고주파의 백색잡음을 제거하였다. 냉각효율을 높이기 위하여 한류소자가 액체 질소에 담그어 있는 상태에서 실험하였다.

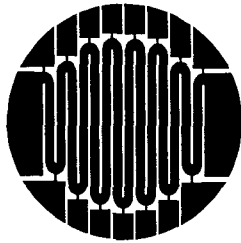


Fig.1. The Au/YBCO meander line thin film fault current limiter pattern

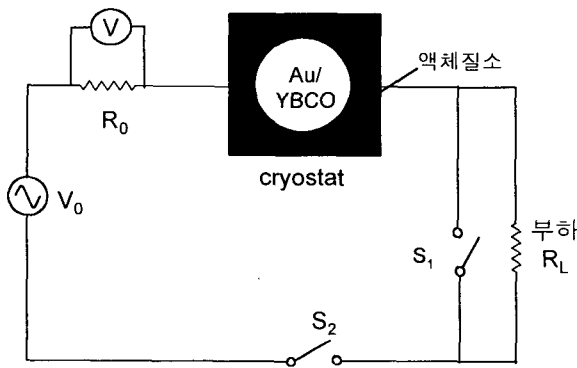


Fig.2. A quench recovery characteristics measurement circuit

3. 결과 및 토의

Fig.3은 사고조건이 제거된 후의 Au/YBCO 박막 meander line 저항의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 시간은 Fig.1의 S₂ 스위치가 열려 사고조건이 제거된 시점을 원점으로 하여 표시하였다. 저항은 초기에는 비교적 완만하게 감소하다가 급격하게 감소하여 zero가 되었다. 전원전압에 따라 초기 저항과 초전도 상태로 회복되어 저항이 zero로 돌아가는 데에 걸리는 시간이 크게 달랐으나 저항이 감소하는 유형은 전원전압에 관계없이 일정하였다. Fig 3(b)에 저항 변화를 semi-log 눈금 상에 나타내었는데 전원전압에 관계없이 천천히 변하는 부분의 data가 모두 일직선 상에 있음을 볼 수 있다. 특히 퀘치 상태에 있는 시간이 길은 전원전압 220 V_{rms}의 경우 이 점을 뚜렷하게 볼 수 있다. 또 하나 주목해야 할 것은 기울기가 비슷하다는 점이다.

Fig.3(c)는 서로 다른 전원전압에서 측정된 data 곡선을 저항이 급격히 변하기 시작한 시점이 일치하도록 수평으로 이동시킨 결과를 보여준다.

다. 세 곡선이 모두 거의 겹쳐 분별하기 어렵는데 이는 저항의 변화가 초기온도에 의해 결정되어 초기온도를 알면 저항의 변화를 예측할 수 있음을 말해준다.

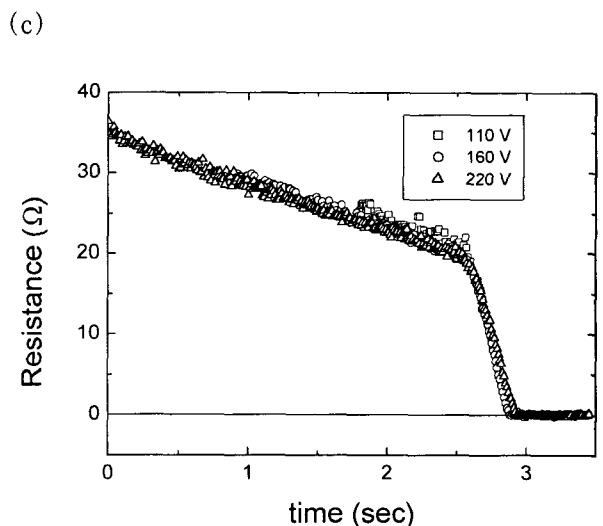
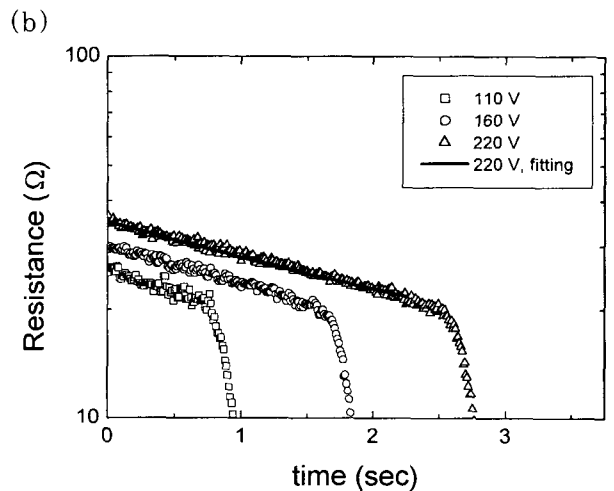
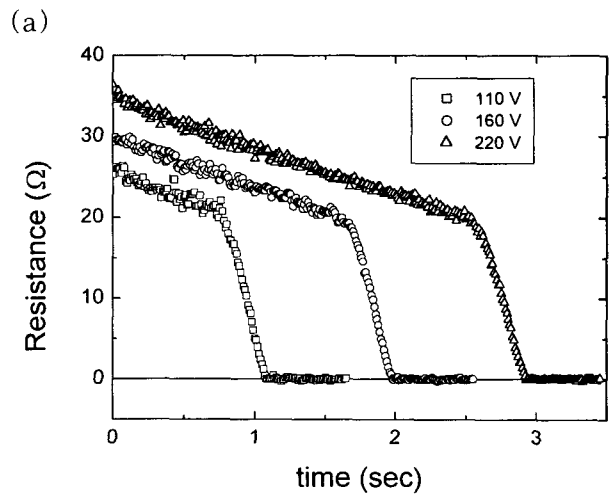


Fig.3. Resistance of a Au/YBCO meander line for selected source voltages after fault condition was removed (a) on a linear scale, and (b) on a semi-log scale. In (c) curves were translated so that the points at which resistance started decreasing rapidly coincide.

4. 결 론

위 측정 결과를 주위로의 열손실 개념으로 설명하였다. Fig.2의 S₁ 스위치가 닫혀 과도전류가 흐름으로 인하여 초전도체 YBCO가 켜치되고 이에 따라 Joule 열이 발생하여 Au/YBCO 박막 meander line의 온도가 올라가고 이에 따라 저항이 올라가게 된다 [6]. S₂ 스위치가 열려 사고조건이 제거되면 전류가 흐르지 않아 더 이상 Joule 열은 발생하지 않지만 주위 액체질소로의 열손실은 계속된다. 이에 따라 Au/YBCO 박막 meander line의 온도가 내려가게 되고 저항도 따라 내려가게 된다. 이 개념을 아래 (1)의 열균형 방정식을 사용하여 수식적으로 설명할 수 있다. (2)는 Au/YBCO meander line 저항의 온도에 따른 일반적인 변화를 나타낸다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = -[G(T - T_b) - \nabla(K \nabla T)] \quad (1)$$

$$R = aT + b \quad (T > T_c \text{에서}) \quad (2)$$

여기서 C는 열용량, G는 액체 질소로의 열전달 계수, T_b는 액체질소의 온도, K는 열전도도, a와 b는 상수이다. 켜치되었던 부분에서의 열은 일부가 일부 주변의 액체질소로 손실되고(우변 첫째 항) 나머지는 sapphire 기판 등 주변의 물질로 전달된다(둘째 항). 이러한 열손실 결과 Au/YBCO 박막 meander line의 온도가 내려가게 된다(좌변). 이전의 연구 결과에 의하면 온도는 위치에 대한 지수함수로 표시할 수 있으므로 [7] (1)은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = -(G - Kg^2)T' \quad (3)$$

여기서 T' = T - T_b이고 ∇(K∇T') = g²T'. (3)의 해는 감쇠함수로서 계수의 비 (G - Kg²)/C가 온도에 따라 많이 변하지 않는다고 가정하고 시간이 충분히 지나면 Au/YBCO 박막 meander line의 온도가 액체질소 온도로 돌아가는 조건을 적용하면 (4)와 같이 표현된다. (2)를 이 결과에 적용하면 (5)로 나타내진다.

$$T = T_0 e^{-t/\tau} + T_b \quad (4)$$

$$\tau = C/(G - Kg^2)$$

$$R = aT_0 e^{-t/\tau} + R_b \quad (5)$$

$$R_b = aT_b + b$$

Fig.3(b)에 보인 결과는 R_b가 aT₀에 비해서 상대적으로 작을 때의 (5)와 같은 거동을 보인다. 전원전압 220 V_{rms}에 대한 data 중 천천히 변하는 부분을 (5)에 맞춘 결과를 그림에 보였는데 (직선) data와 잘 일치함을 볼 수 있다. 직선의 기울기는 -1/τ에 해당한다.

Au/YBCO 박막 meander line으로 구성된 한류소자에서의 켜치상태로부터 초전도상태로의 회복 특성을 측정하였다. 저항은 상대적으로 완만하게 감소하다가 급격히 감소하여 zero가 되었다 완전히 감소하는 영역의 저항 측정치를 semi-log 눈금 상에 표시하였을 때 전원전압에 관계없이 기울기가 거의 같은 직선 상에 들었으며 저항이 급격히 감소하기 시작하는 부분이 겹치도록 저항 곡선을 이동하였을 때 곡선이 전 측정시간 범위에서 겹쳤다. 이 측정결과를 주위로의 열손실 개념을 나타내는 열균형 방정식을 적용하여 정량적으로 설명하였다. 이 연구결과는 Au/YBCO 박막 meander line으로 구성된 한류소자의 회복 특성을 예측함으로써 한류소자의 설계 자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] B. Gromoll, et al., "Resistive fault current limiters with YBCO films - 100 kVA functional model", Appl. Superc. Conf. 1998, Palm Desert, CA, USA, Paper LJA01.
- [2] R. Wordenweber, J. Schneider, A. I. Zaitsev, R. Kutzner, T. Konigs and P. Lahl, "Current limiting properties of superconducting YBCO films on various substrates", IEEE Trans. Appl. Superc. 7, pp. 1021-1023, 1997
- [3] Private communication.
- [4] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO films on sapphire substrates", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, pp. 1369-1372, 1999.
- [5] V. S. Vysotsky, et al., "Quench propagation in large area YBCO films", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, pp. 1089-1092, 1999.
- [6] 김혜림, 최효상, 임해용, 김인선, 현옥배, "금/YBCO 박막에서의 켜치 저항 발생", 2000년도 한국초전도학회, pp. 252-255.
- [7] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Quench distribution in superconducting fault current limiters at various voltages", Submitted to Cryogenics.