

Quench Characteristics of Resistive Superconducting Fault Current Limiters

저항형 초전도 한류소자의 켄치 특성

Hye-Rim KIM, Ok-Bae HYUN, Hyo-Sang CHOI, Si-Dole HWANG
and Sang-Joon KIM

김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준

Power system Laboratory, Korea Electric Power Research Institute
103-16 Munji-dong Yusong-ku, Taejon, Korea 305-380,

대전광역시 유성구 문지동 103-16, 한전 전력연구원 전력계통연구실

We investigated the quench characteristics of meander line type resistive superconducting fault current limiters based on YBCO thin films grown on 2" diameter LaAlO₃ substrates. A gold layer was deposited onto the 0.4 μm thick YBCO film to disperse the heat generated at hot spots, prior to patterning into 1 mm wide meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents of various amplitudes. The quench started at 10 A and was completed within 1 msec at the fault current of 65 A_{peak}. The dynamic quench characteristics were explained based on the heat conduction within the film and the heat transfer between the film and the surrounding liquid nitrogen. The heat transfer coefficient per unit area was estimated to be 3.0 W/cm²K.

1. 서론

초전도체는 임계전류 이하에서 임피던스가 제로이고 과도전류가 흘렀을 때 임피던스가 충분히 높으며 교류 전류 1/2 cycle 이내에 전류를 제한할 수 있고 전류가 임계전류 이하로 감소하였을 때 초전도상태로 회복되는 등 이상적인 한류기의 조건을 모두 만족한다. 초전도 한류기는 저항형과 유도형으로 분류되고 있는데 저항형 한류기는 구조와 원리가 간단하여 소형화할 수 있고 켄치(quench) 시간이 짧은 장점이 있어 독일의 Siemens AG 그룹 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다¹⁾²⁾.

초전도 한류기를 연구개발하는 데에 있어서 켄치 특성에 관한 연구가 필요한데 켄치특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 더욱이 켄치는 케이블, 변압기와 같은 다른 초전도

기기의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이 때문에 저온초전도체의 켄치특성에 관한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구는 많이 되어 있지 않다³⁾⁴⁾. 고온초전도체는 여러 면에서 저온초전도체와 다른 성질을 가지고 있다. 저온초전도체에서는 초전도 상태와 정상 상태의 경계가 분명한데 반해 고온초전도체에서는 경계가 넓고 켄치 특성에 큰 영향을 미치는 열전도도와 열용량에 있어서도 많은 차이가 있다. 따라서 고온초전도체의 켄치 특성은 저온초전도체와 크게 다르리라고 예상된다.

본 연구의 목적은 고온초전도 박막의 켄치특성을 조사하여 한류기와 같은 고온초전도 전력기기의 설계에 기초 자료로 사용하는데 있다. 이를 위하여 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 박막으로 폭 1 mm의 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자를 제작하여 켄치 특성을 측정하고 이를 열균형 방정식으로 설명하였다.

2. 실험

초전도 한류소자는 직경 2 인치의 LaAlO_3 기판 위에 성장된 두께 $0.4 \mu\text{m}$ 의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. 박막은 독일 Prima Tech사에서 구입하였으며 임계온도와 임계전류는 각각 87°C 와 $1.0 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 이다. YBCO 박막은 제조공정 특성상 불균일한데 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 발생하는 열을 분산하기 위하여 YBCO 박막 위에 $0.4 \mu\text{m}$ 두께의 금을 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에(약 100분의 1) quench된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열의 양을 줄이기도 한다. 이외에 금 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하기 때문에 YBCO의 표면을 공기로부터 차단시켜 보호하여야 한다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm의 meander line 모양으로 식각하여 그림 1과 같은 한류소자를 제작하였다.

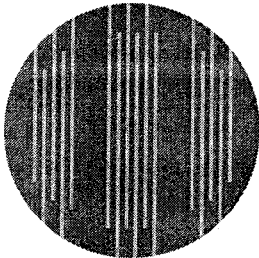


그림 1. 완성된 YBCO 박막 한류 소자

켄치 특성 측정을 위한 장치는 그림 2와 같다. V_0 는 전원전압, R_0 는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항, SFCL은 초전도 한류소자, CT는 회로의 전류를 측정하는데 사용한 변류기이다. 과도전류는 스위치 S_2 를 닫아 발생시켰고 전원전압을 변화시켜 과도전류의 크기를 조정하였다.

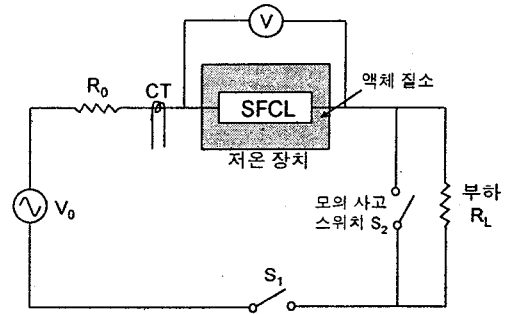


그림 2. 켄치특성 측정 회로

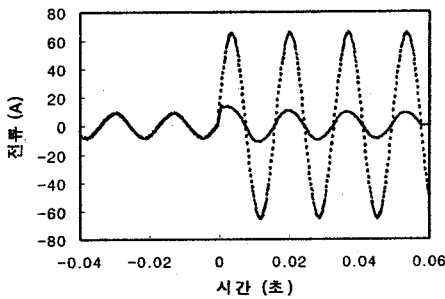
3. 실험결과 및 고찰

그림 3a는 인가전압 V_0 를 $65 \text{ V}_{\text{peak}}$, 저항 R_0 과 부하 저항 R_L 을 각각 1Ω , 7.7Ω 으로 하였을 때의 초전도 한류소자에 흐르는 전류의 파형을 보여준다. 스위치 S_2 를 닫음으로써 과도전류를 회로에 흘렸을 때 한류소자가 없을 때에는 회로에 흐르는 전류가 $65 \text{ A}_{\text{peak}}$ 로 올라가나 한류소자를 삽입하였을 때에는 최대전류 $13 \text{ A}_{\text{peak}}$ 로 제한되었고 3 주기 후에는 $8 \text{ A}_{\text{peak}}$ 로 감소하였다. 즉 한류소자를 사용함으로써 과도전류를 정상전류 수준으로 제한할 수 있었다.

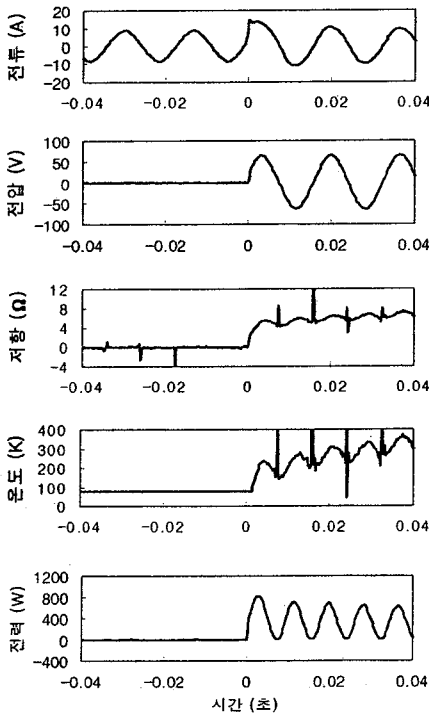
이 한류 현상은 그림 3b에 나타난 바와 같이 과도전류가 흘렸을 때 한류소자의 초전도체 YBCO 박막이 켄치되어 일어난다. 회로에 흐르는 전류가 YBCO 박막의 임계전류를 넘음에 따라 flux의 흐름으로 인하여 저항이 발생하여(그림 3c의 A 부분) Joule 열이 발생하게 된다. 이 Joule 열은 초전도체의 온도를 증가시키게 되는데 YBCO 박막의 온도가 임계온도(87 K) 이상이 되면 상전도체로 전이가 일어나서 저항이 급격히 증가한다. 전이가 일어난 후의 I-V 특성은 그림 3c의 B 부분과 같이 ohmic이다. 상전도 상태에서의 YBCO 박막의 저항은 금 박막 저항의 100 배에 달하기 때문에 전류는 거의 대부분 금 박막으로 흐르게 되므로 그림 3b의 세 번째 그래프에 보인 저항은 곧 금 박막의 저항에 해당한다. 상전도체로의 전이가 일어나 저항이 급격히 증가하면 그림 3b의 다섯 번째 그래프에서와 같이 금 박막에 발생하는 Joule 열이 급격히 증가하여 금 박막의 온도가 상온 이상까지 증가하였다(그림

3b의 네 번째 그래프, 온도는 저항 값으로부터 그림 3d를 이용하여 추정하였다). 온도에 따라 저항이 변하는 금박막의 성질(그림 3d)에 따라 세 번째 그래프에서와 같이 금 박막의 저항이 계속 증가하나 시간이 감에 따라 증가율은 둔화하였는데 이는 금 박막의 온도와 주위의 액체질소와의 온도 차이가 많이 나게 되어 액체질소로의 열전달이 커져서 금/YBCO 박막이 감당할 열이 줄어들었기 때문인 것으로 생각된다.

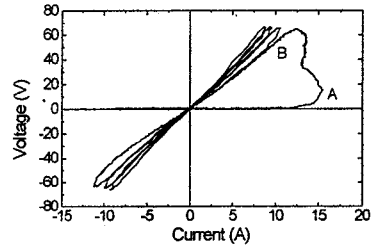
a)



b)



c)



d)

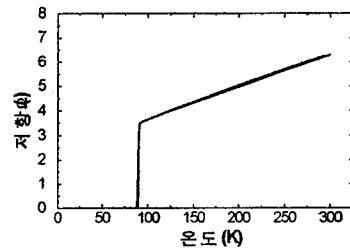


그림 3. YBCO 한류소자의 퀠치 및 한류 특성

- a) 한류기가 있을 때(실선)와 없을 때(점선)의 전류 비교
- b) 전류, 전압, 저항, 소비전력
- c) 전류-전압 특성
- d) 저항의 온도에 따른 변화

퀠치 현상을 이해하기 위하여 퀠치가 완료되기 이전의 data를 분석하였다. 그림 4는 34 A_{peak}의 과도전류가 흘렀을 때의 시간에 따른 금/YBCO 박막 저항의 변화다. 과도전류 발생 후 10 msec 시점까지는 저항이 3.3 Ω 이내인데 그림 3d에서 보면 임계온도 부근의 온도를 제외하고는 금/YBCO 박막의 저항이 3.3 Ω 이내가 될 수 없으므로 이는 금/YBCO meander line의 일부만이 정상 상태로 전이하고 나머지는 초전도 상태에 남아 있음을 의미한다. 따라서 이 영역에서 저항이 증가하는 것은 초전도 상태로 남아 있던 부분이 일부 정상 상태로 전이하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 정상 상태로의 전이가 일어날 수 있는 요인은 세가지를 생각할 수 있다. 하나는 전류가 임계전류를 넘어 초전도 상태로 남아 있던 일부가 퀠치가 되는 것인데 과도전류 발생 5 msec 이후에 전류가 퀠치전류(10 A)보다 작은데도 저항이 계속 증가하는 것으로 보아 이 경우에 해당이 되지 않는다. 두 번째 요인

은 정상 상태에 이른 YBCO 박막의 열이 옆으로 전파되어 옆부분의 YBCO 박막을 정상 상태로 전이시키는 것이다. 세 번째 요인은 금 박막에서 발생한 열이 옆의 금 박막으로 전파되고 그 열의 일부가 그 밑의 YBCO 박막으로 전파되는 것이다. 두 요인 중 YBCO 박막에서보다 금 박막에서의 열전도도가 더 큰 것으로 보아(상온에서 금: 3.1 W/cmK⁵), YBCO: c_{||} 축 방향으로 0.0026 W/cmK, c_⊥ 방향으로 0.02 ~ 0.05 W/cmK⁶) 세 번째 요인이 더 크게 작용할 것으로 생각된다.

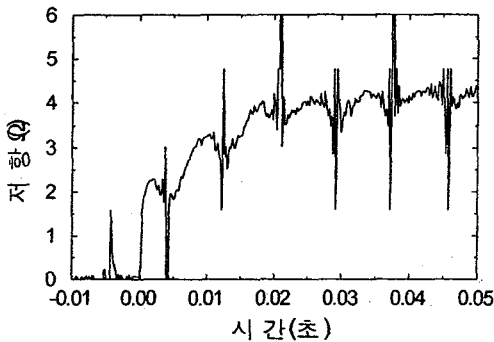


그림 4. 과도전류 34 A_{peak}가 흘렀을 때의 금/YBCO 박막의 저항

퀵 현상을 설명하기 위해서는 금박막에서 발생하는 열 중 액체질소로 전달되는 열의 양을 알아야 하므로 퀵이 완료된 이후의 data로부터 열전달계수를 산정하였다. 퀵이 완료된 후에는 금 박막 온도의 위치에 따른 변화가 적을 것으로 예상되므로 다음의 1차원 열균형 방정식에서 좌변의 두 번째 항을 무시하였다.

$$C \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (K \frac{\partial T}{\partial x}) = P - G(T - T_b) \quad (1)$$

여기서 C는 열용량, T는 온도, K는 열전도도, P는 소비전력, G는 액체 질소로의 열전달계수, T_b는 액체질소의 온도이다. 그림 3b와 같은 P(t), T(t) 그래프를 위 식 (1)에 맞춘 결과 G의 값으로 1.5 ± 0.2 W/K을 얻었다. 상응하는 단위면적당 열전달 계수는 3.0 W/cm²K이다. 이 결과에 의하면 금 박막에서 발생한 Joule 열의 대부분은

액체 질소로 전달되고 일부분만이 금/YBCO 박막의 온도를 올리는데 쓰였다.

4. 결론

2 인치 직경 LaAlO₃ 기판 위에 성장된 YBCO 박막으로 제작한 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자의 퀵 특성을 조사하였다. 퀵치는 10 A(전류 밀도 2.5 MA/cm²)에서 시작하였으며 과도전류가 65 A_{peak}인 경우 1 msec 이내에 완료하였다. 퀵의 진행은 열균형 방정식으로 설명할 수 있는데 금 박막에서 발생한 Joule 열이 옆의 금 박막으로 전도되고 이 중 일부가 다시 YBCO 박막으로 전도됨으로써 전파되는 것으로 생각된다. Data를 열균형 방정식에 맞추어서 액체질소로의 단위면적당 열전달계수를 산정하였으며 그 값은 3.0 ± 0.4 W/cm²K로 나타났다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 박막의 식각에 도움을 준 한국표준과학연구원의 김인선, 임해용 연구원에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Neumueller, 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, IEEE Trans. Appl. Superc. 7, 1021 (1997)
- [3] M. Lindmayer and H. Mosebach, IEEE Trans. Appl. Superc. 7, 1029 (1997)
- [4] T. Kiss, M. Inoue, K. Hasegawa, K. Ogata, V. S. Vysotsky, Y. Ilyin and M. Takeo, Appl. Superc. Conf. 1998, Palm Desert, CA, USA, paper LTA-02
- [5] N. Ashcroft and N. Mermin, Solid State Physics, Holt, Rinehart and Winston, 1976, p.21.
- [6] L. Shaw-Klein, S. Burns, A. Kadin, S. Jacobs and D. Mallory, Superc. Sci. Tech. 5, 368, 1992