

저항형 초전도 한류기에서의 켄치 전파

Quench propagation in resistive SFCL

김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준

한전 전력연구원 전력계통연구실

Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, Hy-Sang Choi, Si-Dole Hwang and Sang-Joon Kim

Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

Abstract

We fabricated resistive superconducting fault current limiters based on $YBa_2Cu_3O_7$ thin films and investigated their quench propagation characteristics. The $YBa_2Cu_3O_7$ film was coated with a gold layer and patterned into 1 mm wide meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents of various fault angles and amplitudes. The quench propagation characteristics were explained based on the heat transfer within the film as well as between the film and the surrounding liquid nitrogen. The quench completion time strongly depended on the potential fault current. It was 1 msec at the peak fault current of 76 A_{peak} and corresponding quench propagation speed was 43 m/sec (film cross section: 4×10^{-6} cm²).

Key words(중요 용어) : $YBa_2Cu_3O_7$, quench(켄치), fault current limiter(한류기), superconductivity(초전도)

1. 서론

초전도체는 이상적인 한류기의 조건을 모두 만족한다. 초전도 한류기는 저항형과 유도형으로 분류되고 있는데 저항형 한류기는 구조와 원리가 간단하여 소형화할 수 있는 장점이 있어 독일의 Siemens AG 그룹 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다¹⁾²⁾. 초전도 한류기를 연구개발하는 데 있어서 켄치 특성에 관한 연구가 필요한데 켄치 특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 더욱이 켄치는 케이블, 변압기와 같은 다른 초전도 기기의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이 때문에 저온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구는 많이 되어 있지 않다³⁾⁴⁾.

본 연구의 목적은 고온초전도 박막의 켄치전파 특성을 조사하여 고온초전도 한류기의 설계에 기초 자료로 사용하는데 있다. 이를 위하여 $YBa_2Cu_3O_7$

(YBCO) 박막으로 폭 1 mm의 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자를 제작하여 켄치전파 특성을 측정하였다.

2. 실험

저항형 초전도 한류소자는 직경 2 인치의 $LaAlO_3$ 기판 위에 성장된 두께 0.4 μ m의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. 박막은 독일 Prima Tech사에서 구입하였다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하는 성질이 있는데 이 비초전도체는 초전도체와 전류도입선 사이의 전류 흐름을 방해하여 접촉저항을 증가시키기 때문에 최소화하여야 한다. 이를 위하여 구입한 YBCO 박막을 dry box에 보관하였고 한류소자를 제작하기 직전에 고순도 산소분위기, 500 °C에서 annealing하였다. 그리고 annealing 즉시 YBCO 박막 위에 금 박막을 증착하여 YBCO 표면을 공기로부터 차단하였다. YBCO는 제조공정 특성상 일반적으로 불균일

한데 금박막은 이러한 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산하는 역할을 하기도 한다. 또한, 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에(각각 $2 \mu\Omega\text{cm}$ 와 $200 \mu\Omega\text{cm}$) 전류를 켜진 hot spot으로부터 우회시켜서 hot spot에서 발생하는 열의 양을 줄이기도 한다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm의 meander line 모양으로 식각하였다. 그 다음 금박막과 YBCO 박막 표면의 접촉력을 증가시켜 양자 간의 접촉저항을 줄이기 위해 위와 같은 조건에서 annealing하였다.

이와 같이 제작한 한류소자를 이용하여 켜치특성 측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 그림 1과 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 발생시켰는데 위상제어기를 사용하여 사고각을 조정하였고 차단기가 보충 3 주기에 작동하는 점을 고려하여 3.5 주기에 스위치 S_1 을 오픈으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 전원전압을 변화시켜 과도전류의 크기를 조절하였다.

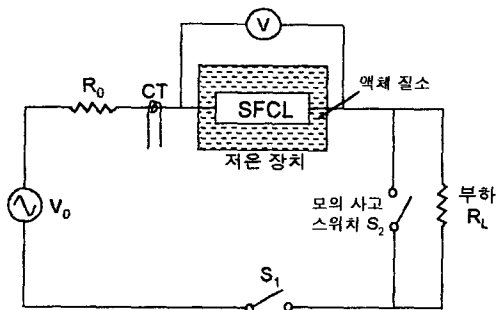


그림 1. 켜치특성 측정 회로

3. 결과 및 토의

그림 2(a)는 $34 A_{peak}$ 의 예상과도전류가 흘렀을 때(즉 $R_0 = 1 \Omega$ 에서 $V_0 = 34 V_{peak}$ 일 때)의 시간에 따른 한류소자 저항의 변화를 나타낸다. 전류가 10 A일 때 켜치가 시작되어(A점) 저항이 4Ω 까지 증가하였다. 과도전류 발생 후 11 msec 시점까지는 저항이 3.3Ω 이내인데(A-B점 사이) 그림 2(b)에서 보면 임계온도 부근을 제외하고는 한류소자의

저항이 3.3Ω 이내가 될 수 없으므로 이는 한류소자 meander line의 일부만이 정상 상태로 전이하고 나머지는 초전도 상태로 남아 있음을 의미한다. 따라서 3.3Ω 이내에서 저항이 증가하는 것은 초전도 상태로 남아 있던 부분이 일부 정상 상태로 전이하기 때문인 것으로 볼 수 있다. 정상 상태로의 전이가 일어날 수 있는 요인 중 하나는 전류가 임계 전류를 넘어 초전도 상태로 남아 있던 일부가 켜치가 되는 것인데 과도전류 발생 5 msec 이후에 전류가 켜치전류보다 작은데도(그림 2(a)의 두 번째 그래프) 저항이 계속 증가하는 것으로 보아 이 경우에 해당이 되지 않는다. 다른 요인은 정상 상태에 이른 부분에서 발생한 열의 일부가 옆으로 전달되어 옆부분을 정상 상태로 전이시키는 것이다. 새로이 정상 상태로 전이된 부분에서 열이 발생하고 위 과정이 반복된다. 즉 켜치가 발생한 지점에서 옆으로 전파하는 것이다.

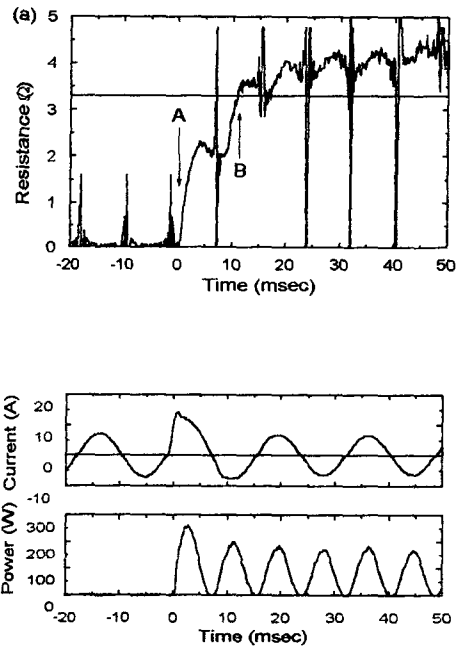


그림 2. 예상과도전류 $34 A_{peak}$ 가 흘렀을 때의 한류소자의 켜치 특성

(a) 저항 및 전류의 시간에 따른 변화

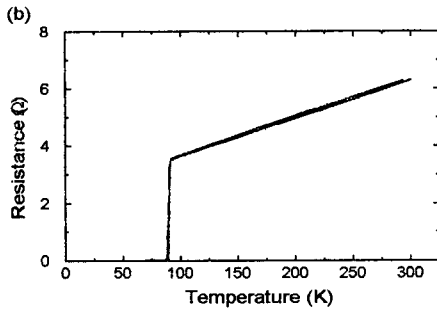


그림 2. (계속)

(b) 한류소자 저항의 온도에 따른 변화

열의 전달은 다음과 같은 열균형 방정식으로 잘 이해할 수 있다.

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

여기서 P 는 소비전력, C 는 열용량, K 는 열전도도, G 는 액체 질소로의 열전달계수, T_b 는 액체질소의 온도이다. 정상 상태에 이른 부분에서 전력 P 가 소비되어 발생한 열이 일부 자신의 온도를 올리는데 사용되고(우변의 첫째 항), 일부 주변의 액체질소와 LaAlO_3 기판으로 전달되고(둘째 항), 나머지가 옆 부분으로 전달된다(셋째 항). 정상 상태에 이른 부분에서 발생한 열이 전달되는 경로는 두 가지를 생각할 수 있다. 한 경로는 정상 상태에 이른 YBCO 박막의 열이 옆으로 전달되어 옆부분의 YBCO 박막을 정상 상태로 전이시키는 경로이고(그림 3(a)), 다른 경로는 금 박막에서 발생한 열이 옆의 금 박막으로 전달되고 그 열의 일부가 그 밑의 YBCO 박막으로 전달되어 정상 상태로 전이시키는 것이다(그림 3(b)). 전류는 새로이 전이된 YBCO 부분을 우회하여 금박막으로 흐르고 이에 따라 Joule 열이 발생하게 되고 위의 과정이 반복되어 퀘치가 전파된다. YBCO 박막에서보다 금 박막에서의 열전도도가 더 크므로(상온에서 금: 3.1 W/cmK ⁵⁾, YBCO: c_{\parallel} 축 방향으로 0.0026 W/cmK , c_{\perp} 방향으로 $0.02 \sim 0.05 \text{ W/cmK}$ ⁶⁾ 두 경로중 주로 두 번째 경로로 열이 전달되어 퀘치가 전파될 것으로 생각된다. 그림 2(a)에서 $4.5 \sim 8.5 \text{ msec}$ 에서는 저항이 감소하고 있는데 이는 발생하는 열이 적은 반면 한류소자의 온도가 이미 많이 올라가 있어서 주변으로 열을 빼앗겨

정상 상태에 있던 YBCO의 일부가 초전도 상태로 돌아갔기 때문이다. 이 경우의 열의 전달 경로는 그림 3(c)에 보인 바와 같다.

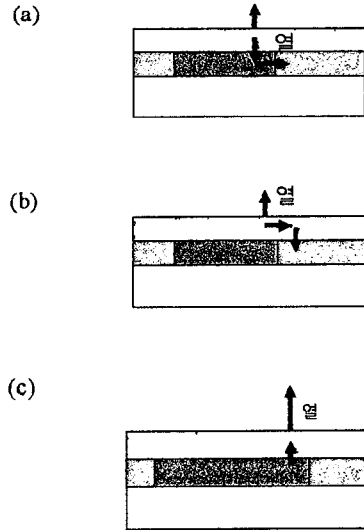


그림 3. 한류소자의 (a)(b) 퀘치 전파 시, (c) 퀘치로부터의 복귀 시 열전달 경로. 노란색 부분은 금 박막, 진하고 열은 회색은 각각 정상, 초전도 상태의 YBCO, 열은 황색은 LaAlO_3 기판을 나타낸다.

퀘치가 완료되는데 걸리는 시간은 예상과도전류가 $34 \text{ A}_{\text{peak}}$ 인 경우 그림 2(a)에서 나타낸 바와 같이 11 msec 이다(A점에서 시작하여 B점에서 완료). 퀘치전파 속도를 단위 시간당 퀘치가 일어난 부분의 길이로 정의한다면 이에 상응한 퀘치전파 속도는 4.3 m/s 이다. 퀘치완료 시간은 그림 4(a)에 보인 바와 같이 예상과도전류에 따라 많은 차이가 있다. 예상과도전류가 $76 \text{ A}_{\text{peak}}$ 인 경우에는 1.1 msec 에 퀘치가 완료되어 퀘치전파 속도가 43 m/sec 에 달하는 반면, $12 \text{ A}_{\text{peak}}$ 인 경우에는 실험한 3.5 주기(58 msec) 이내에 퀘치가 완료되지 않았고 퀘치전파 속도는 40 cm/s 에 그쳤다. 예상과도전류에 따른 퀘치완료 시간의 변화는 그림 4(b)에 보인 바와 같다.

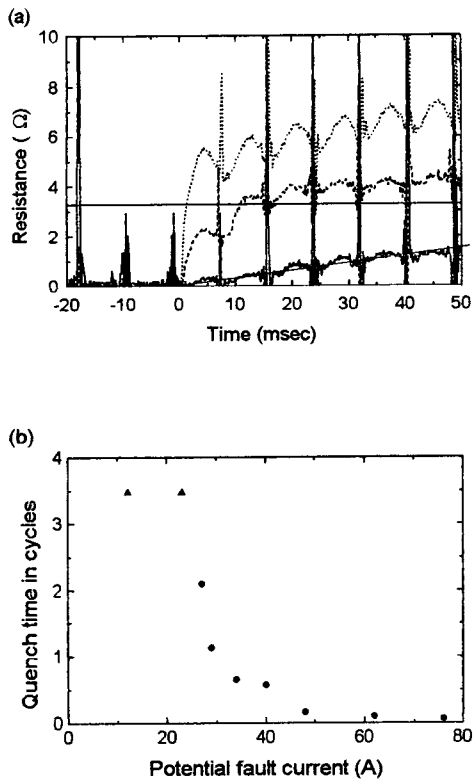


그림 4. 퀘치완료 시간의 예상과도전류에 따른 변화
 (a) 예상과도전류 12(실선), 34(dash), 65(점선)
 A_{peak} 에 대한 시간에 따른 한류소자 저항의 변화
 (b) 퀘치완료 시간 vs. 예상과도전류(위를 향한 삼각형은 퀘치완료 시간이 표시된 값보다 큼을 뜻한다.)

4. 결론

금박막을 입힌 YBCO 박막으로 제작한 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자의 퀘치전파 특성을 조사하였다. 퀘치의 전파는 열균형 방정식으로 설명할 수 있는데 금 박막에서 발생한 Joule 열 중 일부가 옆의 금 박막으로 전도되고 이 중 일부가 다시 YBCO 박막으로 전도됨으로써 전파되는 것으로 생각된다. 퀘치완료 시간은 예상과도전류에 따라 큰 차이를 보였으며 과도전류가 76 A_{peak} 인 경우 1 msec 이내에 완료하였으며 퀘치전파 속도는 43 m/s에 달했다.

참고 문헌

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. Takco, 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