

박막형 초전도 한류기에서의 켄치진행 분포

Distribution of quench progress in thin film superconducting fault current limiters

김혜림*, 현옥배*, 최효상*, 황시돌*, 김상준*

(Hye-Rim Kim*, Ok-Bae Hyun*, Hyo-Sang Choi*, Si-Dole Hwang* and Sang-Joon Kim*)

Abstract

We fabricated thin film superconducting fault current limiters based on $YBa_2Cu_3O_7$ thin films and investigated the distribution of quench progress in the limiters. The limiters were tested with simulated fault currents. Quench progress depended significantly on the position in the limiter with respect to electrodes as well as the fault current magnitude. The heat transfer from limiter meander lines to electrodes explains these results.

Key Words(중요용어) : quench, superconducting, current limiter, $YBa_2Cu_3O_7$

1. 서론

초전도체는 이상적인 한류기의 조건을 모두 만족한다. 초전도 한류기 중 박막형 한류기는 구조와 원리가 간단하여 소형화할 수 있는 장점이 있어 독일의 Siemens AG 그룹[1,2]에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 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 연구[3-5]는 많이 되어 있지 않다. 켄치 특성 중 켄치 진행의 위치에 따른 분포는 더욱 중요하다. 이는 초전도 한류소자 전역이 동시에 켄치되어야 국소적으로 과열하는 것을 막을 수 있기 때문이다.

본 연구의 목적은 고온초전도 한류소자에서의 켄치진행 분포를 조사하여 고온초전도 한류소자의 동시 켄치 연구에 활용하는데 있다. 이를 위하여 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막으로 폭 1 mm 길이 26 cm의 meander line 모양의 저항형 초전도 한류소자 1쌍을 제작하여 박막의 위치에 따른 켄치진행 특성을 측정하고 측정 결과를 열균형 방정식으로 설명하였다.

2. 실험

박막형 초전도 한류소자를 직경 2 인치의 sapphire 기판 위에 성장된 두께 $0.3 \mu\text{m}$ 의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. YBCO 박막은 독일 Theva사에서 구입하였으며 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 3 MA/cm^2 이다. YBCO 박막 성장 직후 insitu로 $0.2 \mu\text{m}$ 두께의 금 박막을 증착하도록 하여 YBCO 표면을 공기로부터 차단하였고 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시키도록 하였다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 9개의 줄(stripe)로 구성된 폭 1 mm, 길이 26 cm의 meander line 형의 초전도 한류소자 한 쌍을 식각하였다. 제작한 저항

* 한전 전력연구원 전력계통연구실
(대전광역시 유성구 문지동 103-16)
Fax: 042-865-5804
E-mail: hrkim@kepri.re.kr

형 한류소자 쌍은 아래 그림 1과 같다(흰 부분이 식각된 부분).

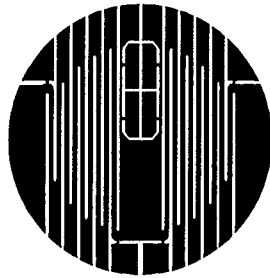


그림 1. 박막형 YBCO 한류기
Fig. 1. A thin film YBCO current limiting element.

제작한 한류소자를 이용하여 켄치특성측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 그림 2와 같다. V_0 는 전원전압, $R_0(=1.0 \Omega)$ 는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항, SFCL은 초전도 한류소자이다. 과도전류는 스위치 S_2 를 닫아 발생시켰는데 차단기가 보통 5 주기에 작동하는 점을 고려하여 5.5 주기에 스위치 S_1 을 오픈으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 과도전류의 크기는 전원전압을 변화시켜 조절하였다. 초전도 한류소자에서의 위치에 따른 켄치진행 특성은 각 줄 양단의 전압을 측정하여 조사하였다. 각 줄 양단의 전압은 줄 양단에 부착한 voltage tap을 사용하여 4 단자법으로 동시에 측정하였다.

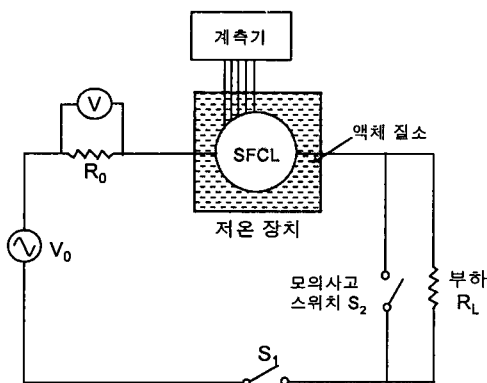
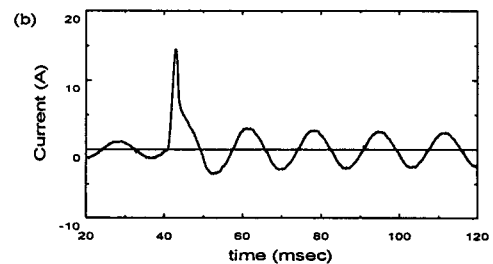
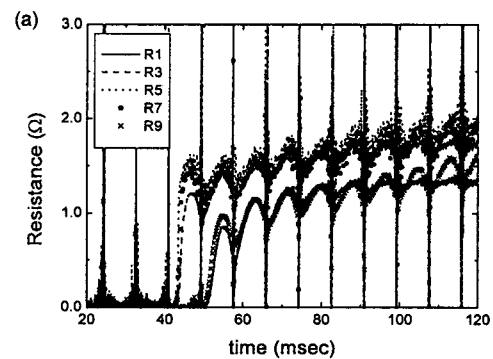


그림 2. 켄치특성 측정 회로
Fig. 2. The quench measurement circuit

3. 결과 및 토의

그림 3(a)는 V_0 이 30 V_{rms}일 때 위 그림 1과 같은 한류소자 줄의 저항 변화를 나타낸다. Data 점을 쉽게 구분해 볼 수 있도록 9개의 줄 중 1, 3, 5, 7, 9번 줄(가장자리 전극에서 첫 번째 줄이 1번 줄)에 대한 변화만 그래프에 나타내었다. 그림에 의하면 5번 줄에서 켄치가 가장 먼저 시작되었고 1 밀리 초 이내에 그 뒤를 3번과 7번 줄이 이음에 따라 저항이 급격히 발생하여 사고전류가 제한되기 시작하였다(그림 3(b)). 이에 따라 소비전력이 상당히 많이 발생하였는데 5번 줄이 이 때 발생한 열을 가장 많이 담당하였고 그 뒤를 3번과 7번 줄이 이었다(그림 3(c)). 1, 9번 줄은 두 번째 반주기에야 켄치가 시작되었고 한류소자에서 발생한 소비전력은 줄 사이에 더욱 더 고르게 분포하게 되었다.

세 번째 반주기부터는 시간이 감에 따라 각 줄의 저항이 대체로 비슷한 비율로 증가하였다. 증가율은 90 Ω/s 이었는데 이는 켄치가 각 줄의 한 지점에서 시작하여 전파되었다고 가정하였을 경우 60 cm/s의 켄치 전파속도에 해당한다. 1번과 3번 줄은 저항의 증가가 둔화하였는데 이는 그들 줄 길이가 상대적으로 짧아 켄치가 일찍 그들 줄 전역으로 전파되었기 때문이다. 임계온도 바로 위에서의 각 줄의 저항은 1.3, 1.8, 2.1, 2.4, 2.5 Ω (1번에서 9번 줄의 순)이다.



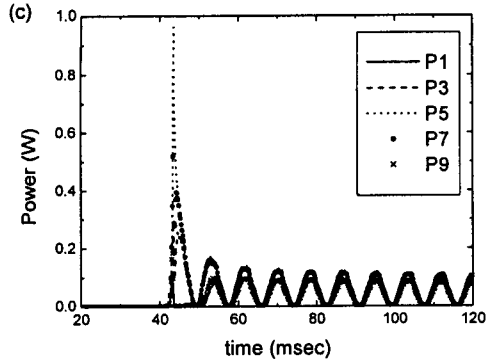


그림 3. 전원 전압 30 V_{rms}에서의 한류 소자 줄의 켄치 특성

Fig. 3. Quench characteristics of stripes on an SFCL with V_0 at 30 V_{rms}.

위 그림 3에서 5번 줄에서 켄치가 먼저 일어난 이유에는 두 가지 가능성이 있다. 첫 번째는 각 줄의 임계전류가 달라 임계전류가 작은 줄에서 먼저 켄치가 일어난 것이고 두 번째는 임계전류가 비슷하여 임계전류를 넘는 전류가 흘렀을 때 동시에 flux flow로 인한 저항이 발생하나 어떤 요인으로 인해 5번 줄의 온도가 먼저 임계온도에 도달하여 켄치되는 것이다. 이를 알아보기 위하여 켄치 초기의 특성을 조사하였다. 그림 4는 전원 전압 V_0 가 9.6 V_{rms} 일 때의 전류 전압 특성을 나타낸 그래프이다. 이 그림에서 1번부터 9번까지 줄 양단 전압이 모두 겹쳐져 있음을 볼 수 있는데 이는 각 줄의 최소 켄치전류가 오차 범위 내에서 모두 같음을 말해준다. 즉 위의 첫 번째 가능성은 여기에 적용되지 않는다.

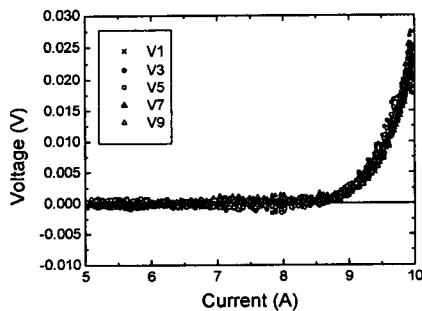


그림 4. 전원 전압 V_0 가 9.6 V_{rms} 일 때의 전류 전압 특성

Fig. 4. Current-voltage characteristics of stripes on an SFCL with V_0 at 9.6 V_{rms}.

위의 두 번째 가능성에 대하여는 아래의 열균형 방정식으로 설명할 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. 켄치된 부분에서 전력 P 가 소비되어 발생한 열이 일부 자신의 온도를 올리는데 사용되고(우변의 첫째 항), 일부 주변의 액체질소와 sapphire 기판으로 전달되고(둘째 항), 나머지가 옆으로 전달된다(셋째 항). 이 중 셋째 항으로 위의 결과를 설명할 수 있다[6]. 켄치가 늦게 시작되는 1, 9번 줄은 전극과 연결되어 있는데 전극은 넓은 면적으로 인하여 이에 흐르는 전류가 임계전류를 넘지 못하므로 항상 액체질소 온도를 유지한다. 한류소자 줄에서 켄치가 본격적으로 시작되려면 줄의 온도가 임계온도 이상으로 증가하여야 하는데, 1, 9번 줄은 전극에 연결되어 있어 셋째 항에 의해 열을 빼앗겨 다른 줄에 비해 늦게 임계온도에 도달하게 된다. 이에 반해 5번 줄은 전극에서 가장 멀기 때문에 열 손실이 가장 적어 온도가 가장 빨리 상승하고 임계온도에 가장 먼저 도달하여 가장 먼저 켄치된 것으로 본다.

그림 5(a)는 V_0 가 70 V_{rms} 일 때(정상 전류 3 A_p, 사고전류 100 A_p) 한류소자 줄의 단위 길이 당 저항 변화를 나타낸다. 사고전류가 임계전류를 넘으면서 줄 전부가 거의 동시에 켄치하여 사고 발생 후 1.6 밀리 초에 사고전류가 급속히 제한되었다(그림 5(b)). 4.2 밀리 초 후에는 각 줄 전 영역이 켄치하여 켄치가 완료되었다(임계온도에서의 단위 길이 당 저항 값은 0.7 Ω/cm으로 그림 5(a)에 수평선으로 표시되어 있음). 이 때문에 그림 5(a)에서는 그림 3(a)에서와는 달리 각 줄의 저항 값 자체 대신 단위 길이 당 저항 값을 표시하였다. 켄치가 완료된 후 각 줄의 온도가 증가함에 따라 단위 길이 당 저항이 서서히 증가하였다. 이 때 단위 길이 당 저항은 각 줄 마다 다소 차이가 있어(분포 범위는 약 0.12 Ω/cm) 5번 줄의 단위 길이 당 저항이 가장 크고 그 다음이 3, 7번 줄, 1, 9번 줄이 가장 작다.

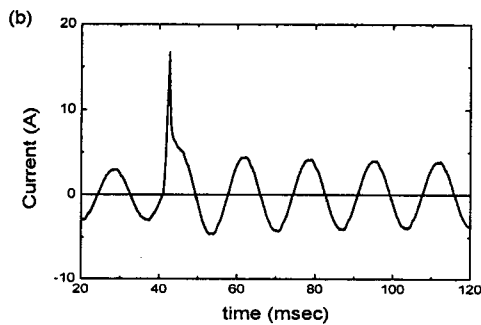
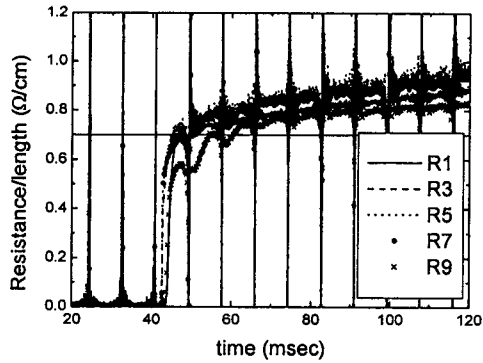


그림 5. 전원 전압 70 V_{rms}에서의 한류 소자 줄의 퀘치 특성

Fig. 5. Quench characteristics of stripes on an SFCL with V_0 at 70 V_{rms}.

이 결과는 그림 3의 경우에서와 같이 전극에 의한 냉각 효과로 설명할 수 있는데 그림 3과 다른 점은 소비전력이 커서 줄들이 거의 동시에 퀘치하기 시작하는 등 전극의 냉각효과가 퀘치진행에 미치는 영향이 작다는 점이다.

4. 결론

박막형 한류소자에서의 시간에 따른 퀘치진행 분포를 측정하였다. 퀘치 진행은 전극에서 가장 멀리 떨어진 가운데 줄에서 퀘치가 가장 빨리 진행되었고 전극 옆에 위치한 줄에서 가장 느리게 진행되었다. 일단 퀘치가 시작한 후에는 각 줄에서 거의 비슷한 속도로 퀘치가 전파하였다. 줄의 위치가 퀘치 진행에 미치는 영향은 사고전류의 크기에 따라

달랐다. 사고전류가 퀘치전류 8 A_p보다 적당히 큰 40 A_p일 때는 퀘치시작 시점이 반주기 차이가 난 반면, 퀘치전류보다 훨씬 큰 100 A_p일 때는 거의 동시에 퀘치가 일어났다. 이 결과는 전극에 의한 냉각 효과로 설명할 수 있다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발 사업의 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Neumueller, "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] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current Limiting Properties of YBCO-Films on Sapphire Substrates", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, pp. 1369-1372, 1999.
- [4] V. S. Vysotsky et al., "Quench Propagation in Large Area YBCO Films", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, pp. 1089-1092, 1999.
- [5] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류소자에서의 퀘치 전파", 전기전자재료학회지, 13권 4호, pp. 339-342, 2000.
- [6] 퀘치된 저온초전도 micro bridge의 온도 분포 simulation에 관한 참고 문헌: W. J. Skocpol, M. R. Beasley and M. Tinkham, "Self-heating hotspots in superconducting thin-film microbridges", J. Appl. Phys. 45, pp. 4054-4066, 19743.