

저항형 초전도 한류기에서의 위치에 따른 켄치진행 변화

김혜림, 현옥배, 최호상, 황시돌, 김상준, 임해웅*, 김인선*
한전 전력연구원, *한국표준과학연구원

Position dependence of quench progress in resistive superconducting fault current limiters

Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, Hyo-Sang Choi, Si-Dole Hwang, Sang-Joon Kim
Hae-Ryong Lim* and In-Seon Kim*

Korea Electric Power Research Institute,

*Korea Research Institute of Standards and Science

hrkim@kepri.re.kr

Abstract - We fabricated resistive superconducting fault current limiters based on $YBa_2Cu_3O_7$ thin films and investigated position dependence of quench progress. The $YBa_2Cu_3O_7$ film was coated insitu with a gold layer and patterned into 1 mm wide meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents. Quench progress depended significantly on the position in the limiter with respect to electrodes. The limiters quenched fastest at the part farthest from the electrodes and slowest next to the electrodes. This phenomenon was more prominent near the minimum quench current. At high fault current the quench started simultaneously on all parts of the limiters and the subsequent progress of quench depended only weakly on the position. The heat transfer from limiter meander lines to electrodes explains these results.

1. 서 론

초전도체는 이상적인 한류기의 조건을 모두 만족한다. 초전도 한류기 중 저항형 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. 더욱이 켄치는 케이블, 변압기와 같은 다른 초전도 기기의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이 때문에 저온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구는 많

이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구[4-6]는 많이 되어 있지 않다. 켄치 특성 중 위치에 따른 켄치 진행 특성은 더욱 중요한데, 이는 초전도 한류소자 전역이 동시에 켄치되어야 국소적으로 과열하는 것을 막을 수 있기 때문이다. 또한 이 특성은 직렬연결된 초전도 한류소자의 동시 켄치 연구에도 활용된다.

본 연구의 목적은 고온초전도 한류소자에서의 위치에 따른 켄치진행 특성을 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

저항형 초전도 한류소자를 직경 2 인치의 sapphire 기판 위에 성장된 두께 $0.3 \mu m$ 의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. YBCO 박막은 독일 Theva사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 $3 MA/cm^2$ 이며, 임계전류는 직경 2" 박막 전역에서 $\pm 10 \%$ 이내로 균일하였다. YBCO는 공기 중의 수분과 반응하여 비초전도체를 형성하는 성질이 있는데 이 비초전체는 초전도체와 전류도입선 사이의 접촉저항을 증가시키기 때문에 최소화되어야 한다. 이를 위하여 YBCO 박막 성장 직후 insitu로 $0.2 \mu m$ 두께의 금 박막을 증착하도록 하여 YBCO 표면을 공기로부터 차단하였다. YBCO는 제조공정 특성상 일반적으로 불균일한데 금박막은 이러한 불균일성으로 인하여 생기는 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시키거나 우회시키는 역할을 하기도 한다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 9개의 stripe으로 구성된 폭 1

mm, 길이 26 cm의 meander line 형의 초전도 한류소자 한 쌍을 식각하였다. 제작한 저항형 한류소자 쌍은 아래 Fig.1과 같다(흰 부분이 식각된 부분).

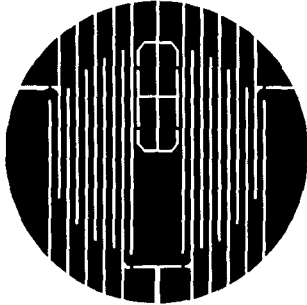


Fig.1. YBCO thin film fault current limiter

제작한 한류소자를 이용하여 켄치특성측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 Fig.2와 같다. V_0 는 전원전압, R_0 는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항, SFCL은 초전도 한류소자, R_f 는 고저항 사고를 모의하는 저항이다. 과도전류는 스위치 S_2 를 닫아 발생시켰는데 위상제어기를 사용하여 사고각을 조정하였고 차단기가 보통 3 주기에 작동하는 점을 고려하여 3.5 주기에 스위치 S_1 을 오픈으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 전원전압과 R_f 를 변화시켜 과도전류의 크기를 조절하였다. 초전도 한류소자에서의 위치에 따른 켄치진행 특성은 각 stripe 양단의 전압을 측정하여 조사하였다. 각 stripe 양단의 전압은 stripe 양단에 부착한 voltage tap을 사용하여 4 단자법으로 동시에 측정하였다

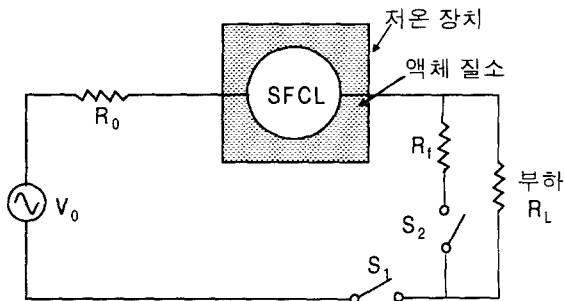
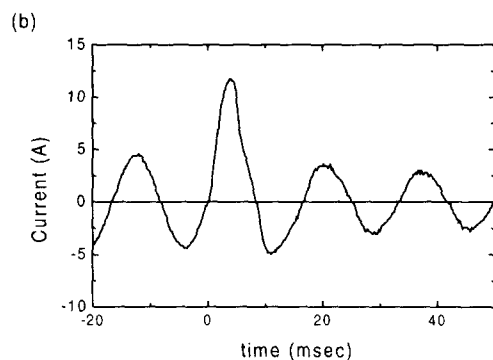
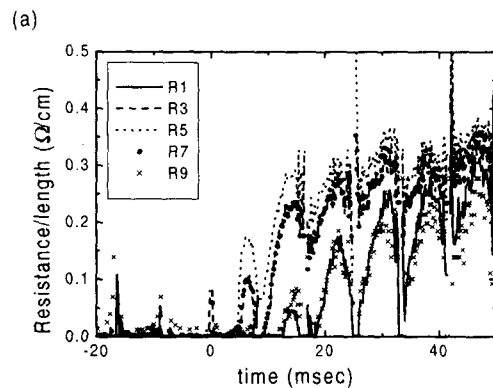


Fig.2. A quench characteristics measurement circuit

3. 결과 및 토의

Fig.3(a)는 V_0 , R_f , R_L 이 각각 20 V_{rms},

1.3 Ω , 5 Ω 일 때(정상 전류 4.4 A_p, 사고전류 10.5 A_p) 위 Fig.1과 같은 한류소자 stripe들의 단위 길이 당 저항 변화를 나타낸다. Data 점을 쉽게 구분해 볼 수 있도록 9개의 stripe 중 1, 3, 5, 7, 9번 stripe(가장자리 전극에서 첫 번째 stripe가 1번 stripe)에 대한 단위 길이 당 저항 변화만 그래프에 나타내었다. 그림에 의하면 5번 stripe에서 켄치가 가장 먼저 시작되어 사고전류가 제한되기 시작하였고(Fig.3b) 단위 길이 당 소비전력이 상당히 많이 발생하였는데 5번 stripe이 이 때 발생한 열을 모두 감당하였다(Fig.3c). 약 1 밀리 초 후에 3, 7번 stripe에서 켄치가 시작됨에 따라 한류소자 전체의 저항이 빠른 속도로 증가하여 전류제한이 가속되었다. 이에 따라 5번 stripe에서 발생하는 소비전력이 감소하고 3, 7번 stripe에서 새로 소비전력이 발생하여 한류소자 전체에서 발생한 소비전력은 3, 5, 7번 stripe 사이에 고르게 분포하였다. 이와 같이 3, 5, 7번 stripe에서는 첫 반주기에 켄치가 시작된 반면 1, 9번 stripe은 두 번째 반주기에야 켄치가 시작되었다. 켄치가 시작된 후 시간이 지나면서 1, 9번 stripe의 저항이 빠른 속도로 증가함에 따라 stripe간의 격차는 줄어들었지만 6번째 반주기가 지난 시점에서 1번과 5번 stripe의 단위 길이 당 저항이 각각 0.22 Ω/cm , 0.35 Ω/cm 로 30 % 이상의 차이가 났다.



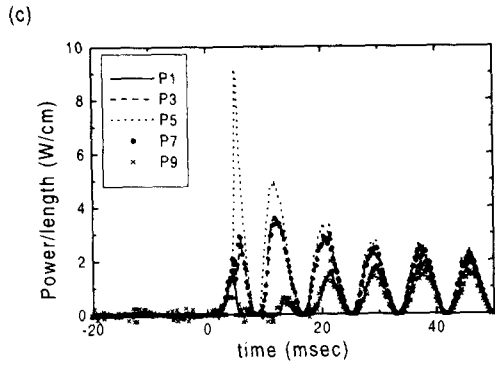


Fig.3. Quench characteristics of stripes on an SFCL (V_0 , R_f and R_L are 20 V_{rms} , 1.3 Ω and 5 Ω , respectively)

위의 결과는 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 액체 질소의 온도이다. 켄치된 부분에서 전력 P 가 소비되어 발생한 열이 일부 자신의 온도를 올리는데 사용되고(우변의 첫째 항), 일부 주변의 액체 질소와 sapphire 기판으로 전달되고(둘째 항), 나머지가 옆 부분으로 전달된다(셋째 항). 이 중 셋째 항으로 위의 결과를 설명할 수 있다. 켄치가 늦게 시작되는 1, 9번 stripe은 전극과 연결되어 있는데 전극은 넓은 면적으로 인하여 이에 흐르는 전류가 임계전류를 넘지 못하므로 항상 액체 질소 온도를 유지한다. Stripe에서 켄치가 본격적으로 시작되려면 stripe의 온도가 임계온도 이상으로 증가하여야 하는데, 1, 9번 stripe은 전극에 연결되어 있어 셋째 항에 의해 열을 빼앗겨 다른 stripe에 비해 늦게 임계 온도에 도달하게 된다. 이에 반해 5번 stripe은 전극에서 가장 멀기 때문에 열 손실이 가장 적어 온도가 가장 빨리 상승하고 임계온도에 가장 먼저 도달하여 가장 먼저 켄치된 것으로 본다.

Fig.4(a)는 V_0 , R_f , R_L 이 각각 100 V_{rms} , 0 Ω , 27 Ω 일 때(정상 전류 5 A_p , 사고전류 140 A_p) 한류소자 stripe의 단위 길이 당 저항 변화를 나타낸다. 사고전류가 임계전류를 넘으면 stripe 전부가 동시에 켄치하여 사고 발생 후 1.2 밀리 초에 사고전류가 급속히 제한되었다(Fig.4b). 이에 따라 소비전력은 Fig.3의 경우에 비해 각각의 stripe에 비교적 고르게 분산하여 발생하였다. 4.2 밀리 초 후에는 각각의 stripe 전 영역이 켄치되어 켄치가 완료되었고(임계온도에서의 단위 길이 당 저항 값은 0.65 Ω/cm 으로 Fig.4(a)에 수평선으로 표시되어 있

음) 그 후 stripe의 온도가 증가함에 따라 단위 길이 당 저항이 서서히 증가하였다. 이 때 단위 길이 당 저항은 Fig.3에서와 같이 각 stripe마다 다소 차이가 있어(약 0.17 Ω) 5번 stripe이 가장 크고 그 다음이 3, 7번 stripe, 1, 9번 stripe이 가장 작다. 이 결과는 Fig.3에서와 같이 전극에 의한 냉각 효과로 설명할 수 있는데 [7] Fig.3과 다른 점은 소비전력이 커서 전극의 냉각효과가 켄치진행에 크게 영향을 미치지 못한다는 점이다. Stripe들이 동시에 켄치 시작하였을 뿐 아니라 1, 9번 stripe도 사고 후 3주기에는 온도가 150 K까지 상승하였다.

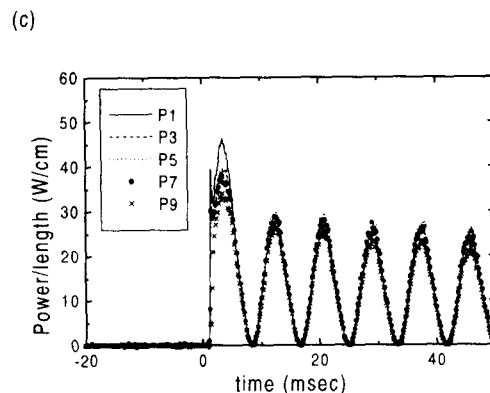
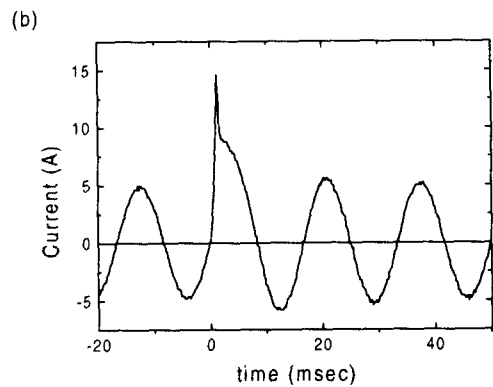
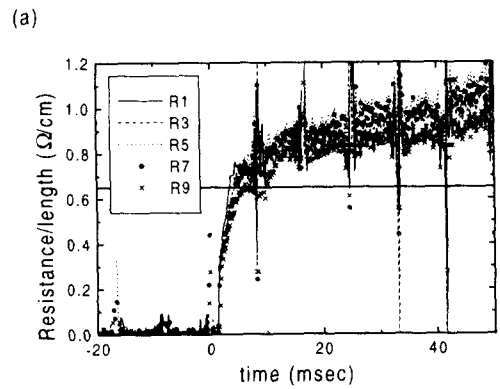


Fig.4. Quench characteristics of stripes (V_0 , R_f and R_L are 100 V_{rms} , 0 Ω , and 27 Ω , respectively)

4. 결 론

저항형 한류소자에서의 켄치 진행 분포를 측정하였다. 켄치 진행은 전극으로부터의 거리에 영향을 많이 받았는데 전반적으로 전극에서 가장 멀리 떨어진 stripe에서 켄치가 가장 빨리 진행되었고 가장 가까운 stripe에서 가장 느리게 진행되었다. 사고전류가 켄치전류 $8 A_p$ 보다 약간 큰 $10 A_p$ 일 때는 stripe의 위치가 켄치 진행에 큰 영향을 미친 반면, 사고전류가 켄치전류보다 훨씬 큰 $140 A_p$ 일 때는 동시에 켄치가 일어나는 등 stripe의 위치가 상대적으로 작은 영향을 미쳤다. 이 결과는 전극에 의한 냉각 효과로 설명할 수 있으며 직렬로 연결된 stripe들의 동시 켄치 연구에 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부 중점국가연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [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] Private communication.
- [4] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Quenching of high- T_c - superconductors and current limitation - numerical simulations and experiments", IEEE Trans. Appl. Superc. 7, pp. 1029-1032, 1997.
- [5] T. Kiss, M. Inoue, K. Hasegawa, K. Ogata, V. S. Vysotsky, Y. Ilyin and M. Takeo, "Quench characteristics in HTSC devices", Appl. Superc. Conf. 1998, Palm Desert, CA, USA, paper LTA-02
- [6] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류소자의 켄치 특성", 1999년도 한국초전도학회, pp. 214-217.
- [7] 켄치된 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, 1974