

# 크기가 다른 박막형 초전도 한류소자에서의 저항 분포

김혜림, 차상도, 최효상, 황시돌, 현옥배, 오제명  
한전 전력연구원,

## Resistance distribution in SFCLs of two different sizes

Hye-Rim Kim, Sang-Do Cha, Hyo-Sang Choi,  
Si-Dole Hwang, Ok-Bae Hyun, and Je-Myoung Oh  
Korea Electric Power Research Institute,

hrkim@kepri.re.kr

**Abstract** - We investigated quench distribution in SFCLs of two different sizes.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  films coated in-situ with a gold layer were patterned into meander lines of two different sizes by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents at various source voltages. The values of resistivity and their time dependence were similar at similar electric fields. The resistivity was nearly uniform except at the edges in both smaller and larger SFCLs. In particular, the resistivity gradient was smaller in larger SFCLs. However, differences between stripe resistivities were larger in larger SFCLs. The results were quantitatively explained with a heat transfer concept.

### 1. 서 론

저항형 초전도 한류기는 구조와 원리가 간단한 장점이 있어 스위스의 ABB[1], 독일의 Siemens AG 그룹[2,3], 일본의 도시바[4] 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 연구는 최근에야 활발해지고 있다[5,6]. 켄치 특성 중 켄치 분포는 특히 중요한데 이는 켄치의 균일 분포 여부가 단위 초전도 한류소자의 용량에 영향을 주기 때문이다.

본 연구의 목적은 크기가 다른 초전도 한류소자에서의 켄치분포를 조사하여 단위 초전도 한류소자의 용량증대 연구에 활용하는데 있다. 이를 위하여 크기가 다른 초전도 한류소자에서의 위치별 저항을 측정하고 측정 결과를 한류소자에서

주위로의 열 전달 개념을 사용하여 정량적으로 설명하였다.

### 2. 실 험

저항형 초전도 한류소자를 직경 2 인치 두께 0.3  $\mu\text{m}$ 의 YBCO 박막을 사용하여 제작하였다. YBCO 박막은 sapphire 기판 위에 성장된 것으로 독일 Theva 사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 3 MA/cm<sup>2</sup>이었다. YBCO 박막을 공기 중의 수분으로부터 보호하고 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시키거나 우회시키기 위하여 YBCO 박막 성장 직후 in-situ로 0.2  $\mu\text{m}$  두께의 금 박막을 증착하도록 하였다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 14개의 stripe으로 구성된 폭 2 mm 길이 42 cm의 meander line과 9개의 stripe으로 구성된 폭 1 mm 길이 26 cm의 meander line 한 쌍을 식각하였다. 한류소자 pattern은 아래 Fig.1과 같다(흰 부분이 식각되는 부분).

Au/YBCO meander line형 한류소자를 이용하여 켄치분포 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 오픈으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 과도전류의 크기는 전원전압을 변화시켜 조절하였다. 켄치분포는 meander line의 각 stripe 양단에 있는 전압단자 간의 전압을 다중 channel digitizer로 동시에 측정하여 얻었다. 1 쌍의 meander line이 있는 한류소자에는 전류단자를 가장자리와 중앙에 연결하여 meander line 한 개에서의 켄치분포를 측정하였다. 냉각효율을 높이기 위하여 한류소자가 액체 질소에 담그어 있는 상태에서 실험하였다.

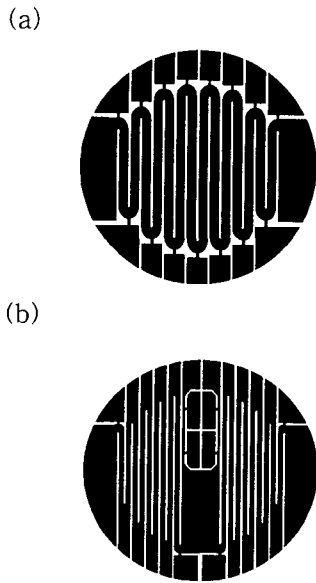


Fig.1. The Au/YBCO meander line thin film SFCL pattern. (a) An SFCL, (b) a pair of SFCLs on a 2" diameter wafer,

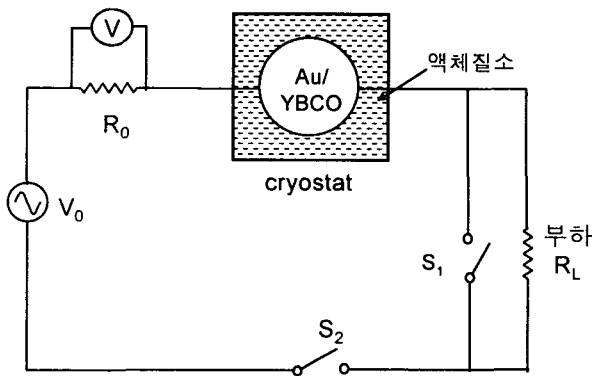


Fig.2. A circuit for quench distribution characteristics measurement

### 3. 결과 및 토의

Fig.3은 Fig. 1(a)에 보여진 SFCL (SFCL1)의 인가전압 220 V(5.2 V/cm)에서의 비저항분포를 보여주고, Fig. 4는 Fig. 1(b)에 보여진 반쪽 SFCL (SFCL2)의 150 V(5.8 V/cm)에서의 비저항분포를 보여준다. 그림에서 단위길이당 인가전압(전기장의 세기)이 비슷한 경우 비저항의 값이나 시간에 따른 변화가 대체로 비슷함을 볼 수 있다. Meander line의 온도와 비저항과의 관계로부터 온도를 유출하였는데 6주기 쯤에 약 280 K에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 stripe들의 저항 간에 차이가 있음을 볼 수 있다. stripe 비저항 간의 격차가 SFCL2에서보다 SFCL1에서 더 컸다. 또한 SFCL2에서는 모든 stripe에서 동시에 켄치가 일어난데 반해, SFCL1의 경우 가장 자리에 있는 stripe에서는 동시에 켄치가 일어나지 않았다. 동시에 켄치가 일어나지 않으면 켄치

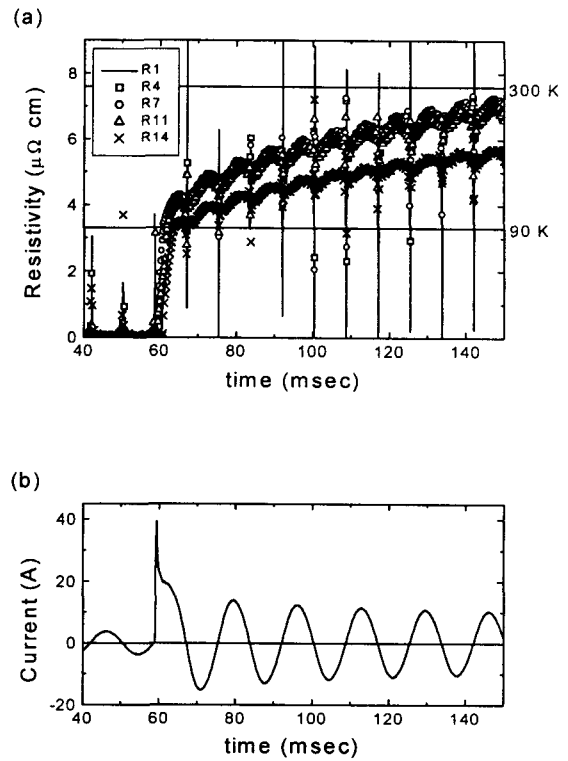


Fig.3. (a) Resistivity and (b) current of SFCL1 at source voltage of 220 V.

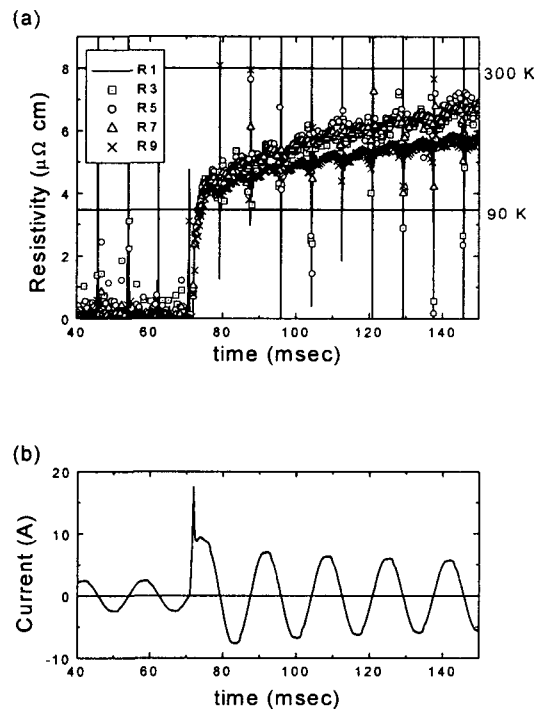


Fig.4. (a) Resistivity and (b) current of SFCL2 at source voltage of 150 V.

된 stripe들이 발생하는 열을 부담해야 하므로 바람직하지 않다. 따라서 동시켄치를 유도하는 방안이 필요하다.

SFCL1과 SFCL2에서의 stripe 비저항 분포를 좀더 명확히 비교하기 위해서 그림 5에 사고 후 4주기(54 msec)에서의 위치에 따른 stripe 비저항을 보였다. 위에서 언급한 특성 외에 SFCL1과 SFCL2 모두 비저항이 가장자리 stripe을 제외한 전역에서 비교적 균일함을 볼 수 있다. 특히 SFCL2에서보다 SFCL1에서 비저항구배가 작아 30 mm에 걸쳐 균일함을 볼 수 있다. 이 특성은 퀠치 시 발생하는 열이 전역에서 거의 균일함을 뜻하며 SFCL의 안정적인 동작에 중요한 역할을 한다. 그림 6에 저항을 가운데 stripe의 저항으로 나눈 값을 위치의 함수로 나타내었다. 각 stripe의 저항 비가 인가전압에 별로 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다.

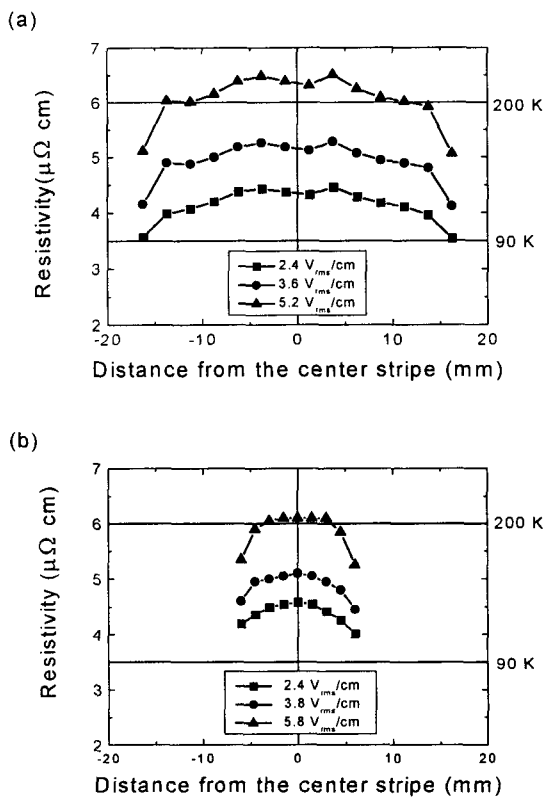


Fig. 5. Position dependence of resistivity at 54 msec(4th cycle) in (a) SFCL1, and (b) SFCL2.

위 측정 결과를 퀠치로 발생한 열의 전달 개념으로 설명할 수 있다. 열전달 개념은 아래 (1)의 열균형 방정식을 사용하여 수식적으로 설명할 수 있다. (2)는 Au/YBCO meander line 저항의 온도에 따른 일반적인 변화를 나타낸다.

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

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

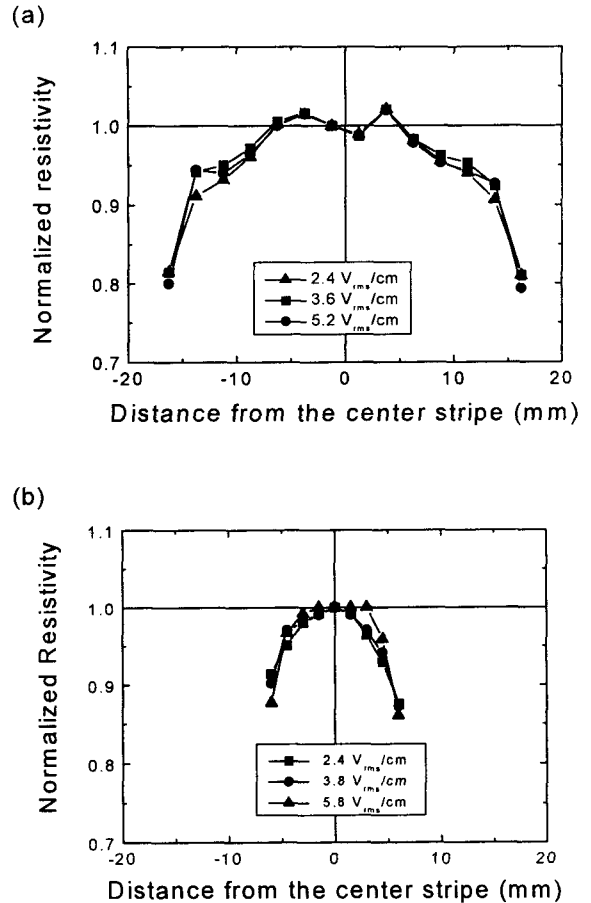


Fig. 6. Position dependence of normalized resistivity at 54 msec(4th cycle) in (a) SFCL1, and (b) SFCL2.

여기서  $C$ 는 열용량,  $G$ 는 액체 질소로의 열전달 계수,  $T_b$ 는 액체질소의 온도,  $K$ 는 열전도도,  $a$ 와  $b$ 는 상수이다. 퀠치로 발생한 열(우변)은 일부가 일부 주변의 액체질소로 손실되고(좌변 둘째 항) 일부는 sapphire 기판 등 주변의 물질로 전달된다(좌변 세째항) 나머지가 박막의 온도를 증가시킨다(좌변 첫째항). 적절한 가정과 경계조건을 적용하면 비저항을 가운데 stripe의 비저항으로 나눈 값을 아래와 같이 해석적으로 나타낼 수 있다 [7].

$$\frac{\rho(x)}{\rho(0)} = \frac{1 - p \cosh(gx) / \cosh(gL/2)}{1 - p / \cosh(gL/2)} \quad (3)$$

여기서  $p$ 와  $g$ 는 상수,  $L$ 은 전극과 전극 사이의 거리이다. 그림 7에 SFCL1과 SFCL2의 비저항을 가운데 stripe의 비저항으로 나눈 값을 위 식 (3)에 맞춘 결과를 보였다. Data는 대체로 식 (3)에 잘 맞음을 볼 수 있다. SFCL1의 경우 data가 다소 흩어져 있는 것은 YBCO 박막의 임계전류 분포가 부분적으로 불균일한 때문으로 생각된다.

## [참 고 문 헌]

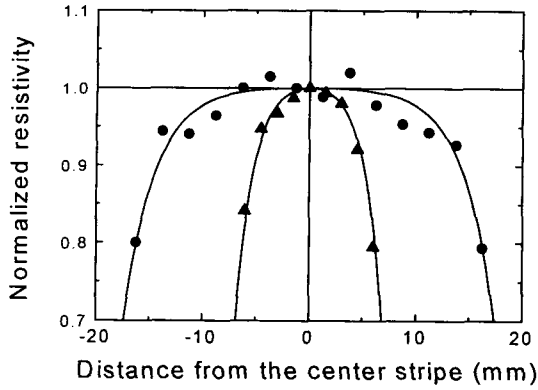


Fig.7. Normalized resistivity of SFCL1 (circles) and SFCL2 (triangles) at 54 msec(4th cycle) after the fault and fits to Eq. (3).

## 4. 결 론

크기가 다른 초전도 한류소자에서의 저항분포를 측정하였다. 단위길이 당 인가전압이 비슷할 때에는 비저항의 값과 시간에 따른 변화가 비슷하였으나 stripe 저항 간의 차이는 큰 소자에서 작은 소자에서보다 다소 컸다. 특히 켄치 초기에 큰 소자에서는 가장자리에서 동시 켄치되지 않았다. 그러나 큰 소자와 작은 소자 모두에서 가장자리 stripe에서를 제외하고는 거의 균일하였으며 특히 큰 소자에서 비저항의 구배가 작았다. 이 특성은 켄치로부터 발생하는 열의 분산과 관련하여 바람직한 현상이다. 측정 결과는 큰 소자와 작은 소자 모두 한류소자에서 주위로의 열전달 개념을 사용하여 정량적으로 설명하였다.

## 감사의 글

본 연구의 일부는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

[1] M. Chen et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", Eur. Conf. Appl. Superc. 2001, Copenhagen, Denmark, Paper G4-01.

[2] W. Schmidt et al., "Development of a resistive fault current limiter of the 1 MVA class", Appl. Superc. Conf. 2000, Virginia Beach, USA, paper 2LL01.

[3] 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

[4] Y. Kudo, "Improvement of maximum working voltage of resistive fault current limiter using YBCO thin film and metal thin film", Eur. Conf. Appl. Superc. 2001, Copenhagen, Denmark, Paper G4-02.

[4] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO films on sapphire substrates", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, pp. 1369-1372, 1999.

[6] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Initial quench development in uniform Au/Y-Ba-Cu-O thin films", IEEE Trans. Appl. Superc., 11, pp. 2414-2417, 2001

[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", Cryogenics 41, pp. 275-280, 2001.