

박막형 대면적 초전도 한류소자에서의 저항 분포

Resistance distribution in large area thin film type SFCLs

김혜림*, 현옥배**, 최효상*, 차상도***

Hye-Rim Kim*, Ok-Bae Hyun**, Hyo-Sang Choi*, and Sang-Do Cha***

Abstract: We investigated the resistance distribution in 4" diameter SFCLs. $YBa_2Cu_3O_7$ films coated in-situ with a gold layer were patterned into 3 mm wide 142 cm long meander lines by photolithography. The limiters were tested with simulated fault currents. The resistance was uniform all over the film except at the edge. At lower source voltages, SFCLs did not quench simultaneously and the resistance distribution was less uniform. Compared with 2" diameter SFCLs, 4" SFCLs had similar values and time dependence of resistivity at similar electric fields. The resistance distribution was more uniform in 4" SFCLs. The area at the edge where the distribution was not uniform was around 3 mm wide in SFCLs of both sizes. The experimental results were quantitatively explained with a heat transfer concept.

Key Words: superconducting, fault current limiter, quench, $YBa_2Cu_3O_7$

1. 서 론

저항형 초전도 한류기(superconducting fault current limiter, SFCL)는 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 데 있어서 켄치 특성에 관한 연구가 필요한데 켄치 특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 이 때문에 고온초전도체의 켄치 특성에 관한 연구가 활발해지고 있다[5]. 켄치 특성 중 켄치 분포는 특히 중요한데 이는 켄치의 균일 분포여부가 단위 초전도 한류소자의 용량에 영향을 주기 때문이다.

본 연구의 목적은 대용량 초전도 한류기 제작에 사용될 직경 4"의 단위 초전도 한류소자에서의 켄치분포를 조사하여 단위 소자의 용량증대 연구에 활용하는데 있다. 이를 위하여 직경 4" 초전도 한류소자에서의 위치별 저항을 측정하고 측정 결과를 한류소자에서 주위로의 열전달 개념으로 정량적으로 설명하였다.

2. 실험방법

직경 4" 두께 0.3 μm 의 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 사용하여 초전도 한류소자를 제작하였다. YBCO 박막은 sapphire 기판 위에 성장된 것으로 독일 Theva 사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 3 MA/cm²이었다. YBCO 박막을 공기 중의 수분으로부터 보호하고 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키거나 우회시키기 위하여 YBCO 박막 성장 직후 in-situ로 0.2 μm 두께의 금 박막을 증착하도록 하였다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 24개의 stripe으로 구성된 폭 3 mm 길이 142 cm의 meander line을 식각하였다. 4" 한류소자와 비저항 특성을 비교한 2" 한류소자의 pattern은 아래 그림 1과 같다(흰 부분이 식각되는 부분). 2" 한류소자의 meander line 폭은 2 mm, 길이 42 cm이었다.

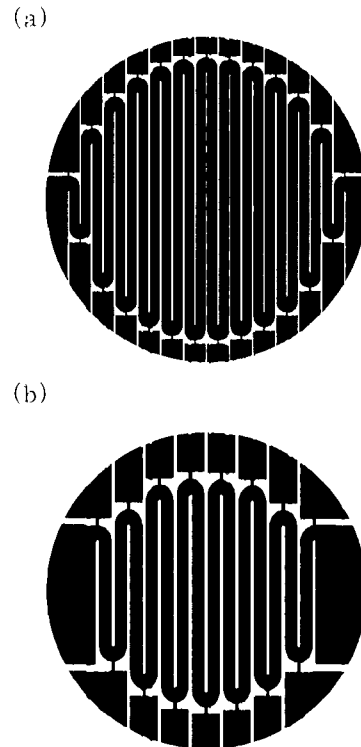


그림 1. 직경 (a) 4", (b) 2" 초전도 한류소자.
Fig. 1. (a) A 4" and (b) a 2" diameter SFCL unit.

제작한 초전도 한류소자를 이용하여 저항분포 측정 실험을 수행하였으며 실험장치는 그림 2와 같다. V_0 는

* 정 회 원 : 한전전력연구원 신에너지그룹 선임연구원

** 정 회 원 : 한전전력연구원 신에너지그룹 책임연구원

*** 정 회 원 : 한전전력연구원 신에너지그룹 위촉연구원

원고접수 : 2002년 04월 06일

심사완료 : 2002년 05월 16일

전원전압, R_0 는 회로의 전류를 측정하고 사고 시 초전도 한류소자가 켄치하지 않을 때 회로를 보호하기 위한 저항, SFCL은 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. 냉각효율을 높이기 위하여 한류소자가 액체질소에 잠겨있는 상태에서 실험하였다.

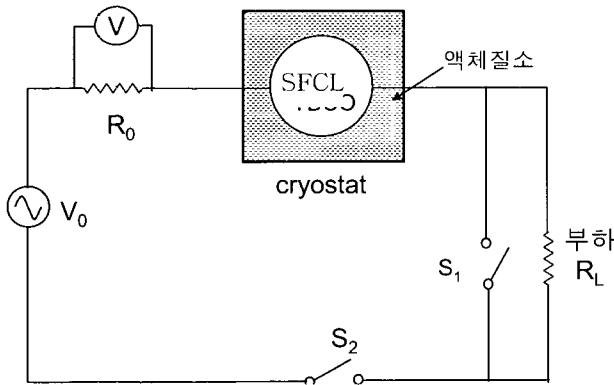


그림 2. 켄치분포 측정 회로
Fig. 2. A circuit for quench distribution characteristics measurement

3. 결과와 토의

그림 3은 4" 박막 초전도 한류소자의 다섯 stripe의 비저항과 전류를 보여준다. 그래프 상의 곡선을 보기 쉽도록 구분하기 위해서 24개의 stripe 중 1, 7, 13, 18, 24번 stripe를 선택해서 보였다. 저항 곡선 상의 수직 선들은 계산과정에서 생긴 것으로서 각 반주기의 경계선을 잘 나타내주므로 남겨놓았다. 인가전압은 600 V(4.2 V/cm)이었다. 그림 3(a)에서 5개 stripe 모두가 동시에 켄치되었음을 볼 수 있다. 이 현상은 실용적인 면에서 중요한데 모든 stripe이 동시에 켄치되면 켄치시 발생하는 열이 4" 박막 전역에서 고르게 배분되어 초전도 한류소자의 안정적인 동작에 중요한 역할을 한다. 초기에는 가장자리 stripe의 비저항이 크나 시간이 지남에 따라 가운데 stripe의 비저항이 크게되었다. 켄치가 발생한 후 주위로 전파하여 켄치가 완료되는데 가장자리 stripe은 길이가 짧아(그림 1) 켄치가 먼저 완료되었다[6]. 그러나 시간이 지남에 따라 가장자리 stripe이 주변의 액체질소에 의해 냉각되어 비저항이 가장 작게 된다 [6]. Meander line의 비저항을 온도의 함수로 측정한 결과로부터 stripe의 온도를 유출하였는데 6주기 췌에 약 230 K에 이르는 것으로 나타났다.

그림 4는 4" 박막 초전도 한류소자의 인가전압 350 V(2.4 V/cm)에서의 비저항과 전류를 보여준다. 전체적으로 거동이 비슷하나 비저항의 값이 600 V에서보다 작았고 초기에 동시켄치가 이루어지지 않았다. 인가전압이 작으면 열이 작게 발생하여 비저항이 작아지고 [7,8], 켄치전파속도가 낮아서 가장자리 stripe은 두 번째 반주기에야 켄치가 시작되었다.

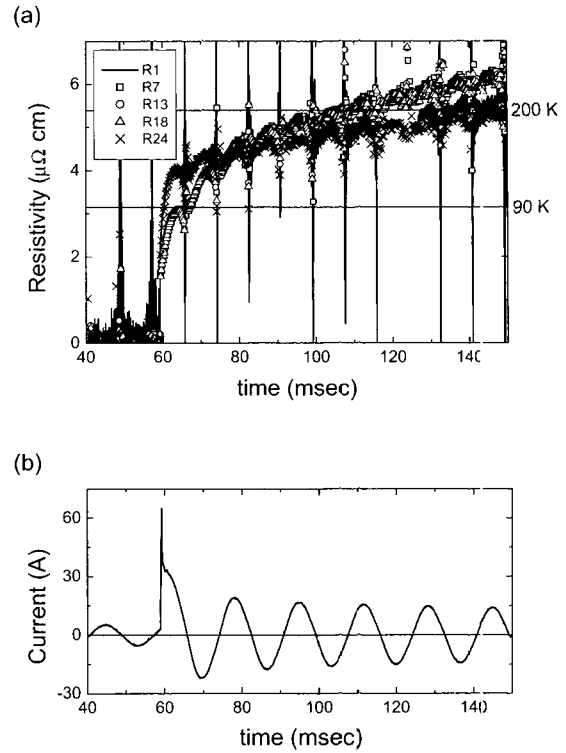


그림 3. 4" 박막 초전도 한류소자의 (a) 비저항과 (b) 전류. 인가전압 600 V.
Fig. 3. (a) Resistivity and (b) current of a 4" diameter SFCL at source voltage of 600 V.

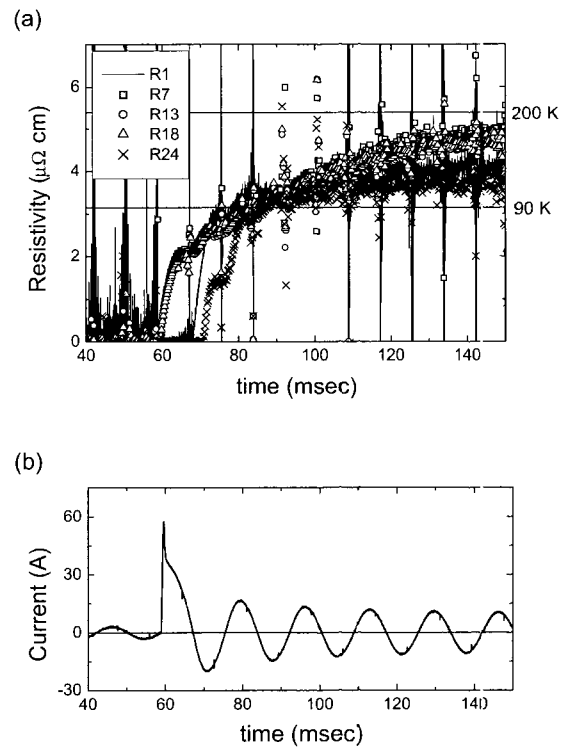


그림 4. 4" 박막 초전도 한류소자의 (a) 비저항과 (b) 전류. 인가전압 350 V.
Fig. 4. (a) Resistivity and (b) current of a 4" diameter SFCL at source voltage of 350 V.

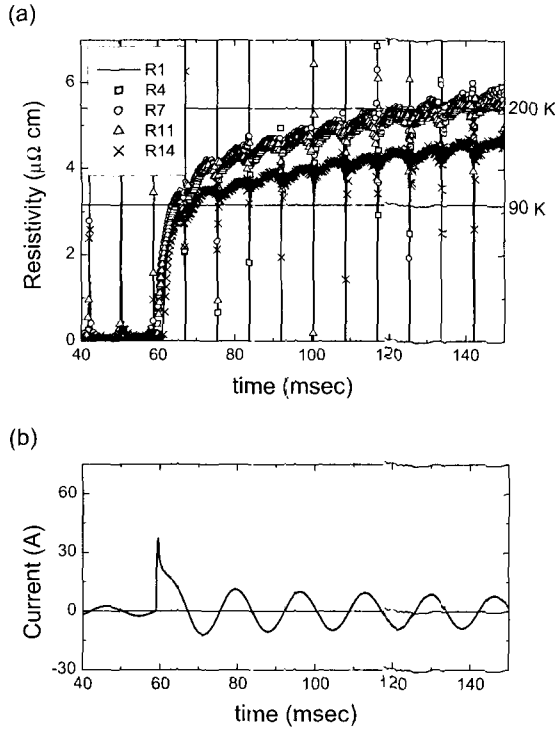


그림 5. 2" 박막 초전도 한류소자의 (a) 비저항과 (b) 전류. 인가전압 150 V.
 Fig. 5. (a) Resistivity and (b) current of a 2" diameter SFCL at source voltage of 150 V.

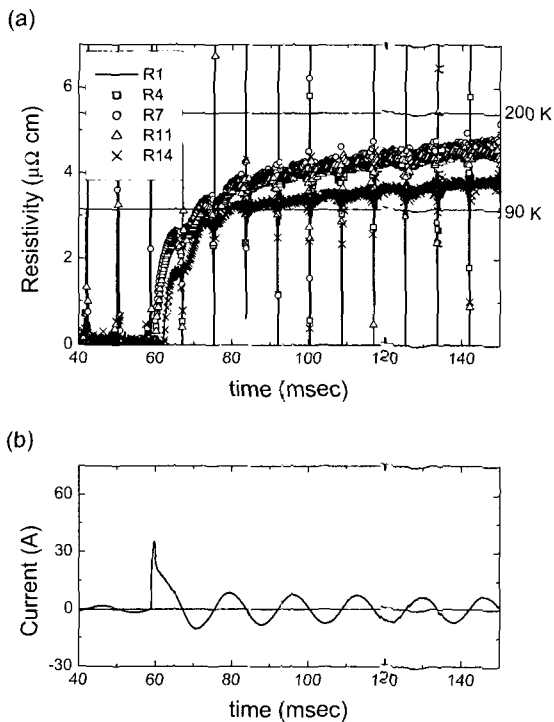


그림 6. 2" 박막 초전도 한류소자의 (a) 비저항과 (b) 전류. 인가전압 100 V.
 Fig. 6. (a) Resistivity and (b) current of a 2" diameter SFCL at source voltage of 100 V.

초전도 한류소자의 크기가 비저항 거동에 미치는 영향을 보기 위해서 그림 5와 6에 2" 초전도 한류소자의 비저항과 전류를 보였다. 인가전압은 각각 150 V(3.6 V/cm)와 100 V(2.4 V/cm)이다. 그림들에서 단위길이당 인가전압(전기장의 세기)이 비슷한 경우 비저항의 값이나 시간에 따른 변화가 대체로 비슷함을 볼 수 있다. 인가전압 150 V에서 6주기 짝에 약 220 K에 이르는 것으로 나타났고 가운데 stripe의 비저항이 가장 컸다.

4" 초전도 한류소자에서의 비저항 분포를 좀더 명확히 알기 위해서 그림 7(a)에 사고 후 6주기(88 msec)에서의 위치에 따른 stripe 비저항을 보였다. 그림에서 비저항이 가장자리 stripe를 제외한 전역에서 비교적 균일함을 볼 수 있다. 인가전압에 따른 비저항 분포를 보기 위해서 그림 7(b)에 비저항을 가운데 stripe의 비저항으로 나누어 정규화한 값을 보였다. 인가전압이 높을 때 더 균일한 것으로 나타났는데 이는 초전도 한류소자가 고전압에서 사용될 것을 고려할 때 바람직한 현상이다.

초전도 한류소자의 크기가 비저항 분포에 미치는 영향을 보기 위해서 그림 8에 2" 초전도 한류소자의 비저항과 정규화한 비저항을 보였다. 2" 소자에서는 비저항이 4" 소자에서만만큼 균일하지 않았다. 여기서 주목할 것은 가장자리 부분의 비저항의 구배가 4" 소자에서나 2" 소자에서나 비슷하다는 점이다. 인가전압의 영향은 4" 소자에서처럼 크지는 않았어도 인가전압이 클 때 더 균일하였다.

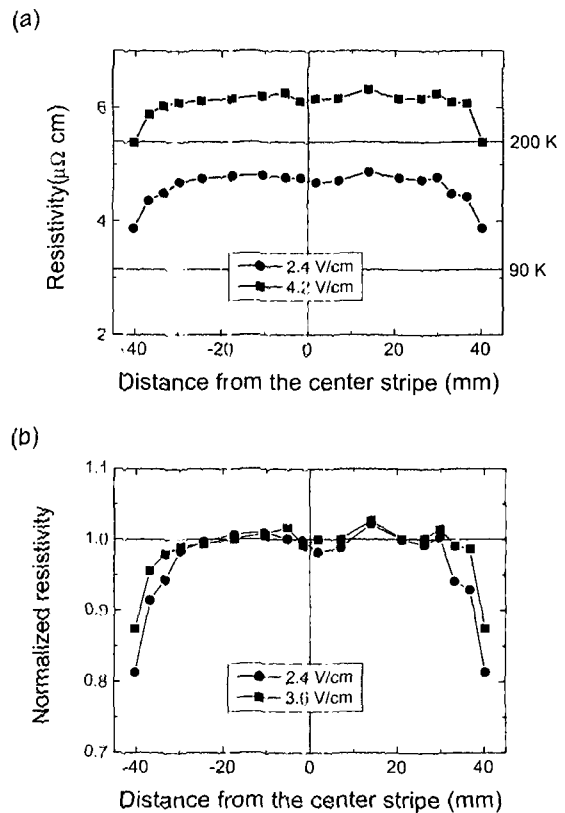


그림 7. 4" 초전도 한류소자의 위치에 따른 (a) 비저항, (b) 정규화한 비저항. 사고 후 88 밀리초 (6째 주기)
 Fig. 7. Position dependence of (a) resistivity and (b) normalized resistivity at 88 msec(6th cycle) in a 4" diameter SFCL.

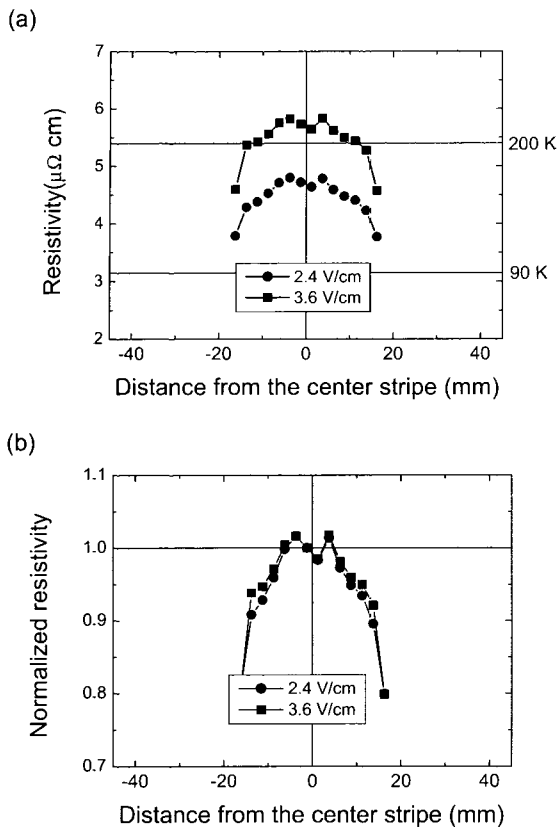


그림 8. 2" 초전도 한류소자의 위치에 따른 (a) 비저항, (b) 정규화한 비저항. 사고 후 88 밀리초 (6째 주기)
 Fig. 8. Position dependence of (a) resistivity and (b) normalized resistivity at 88 msec(6th cycle) in a 2" diameter SFCL.

위 측정결과를 켄치로 발생한 열의 전달 개념으로 설명할 수 있다. 초전도 한류소자가 켄치되면 회로의 전류가 비저항이 작은 금박막으로 우회하여 금박막에서 주열열이 발생한다. 대부분의 열이 액체질소 등 주변으로 전달되고 남은 일부가 초전도 한류소자의 온도를 증가시킨다. 초전도 한류소자의 비저항은 특성상 온도가 증가함에 따라 선형으로 증가하므로 초전도 한류소자의 온도가 올라감에 따라 비저항이 증가한다. 이 열전달 개념은 아래 식(1)의 열균형 방정식을 사용하여 수식으로 설명할 수 있다. 식(2)는 한류소자 비저항의 온도에 따른 일반적인 변화를 나타낸다.

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

$$\rho = aT + b \quad (\text{상전도 상태에서}) \quad (2)$$

여기서 C 는 열용량, G 는 액체 질소로의 열전달계수, T_b 는 액체질소의 온도, K 는 열전도도, a 와 b 는 상수이다. 켄치로 발생한 열(우변)은 일부가 일부 주변의 액체질소로 손실되고(좌변 둘째 항) 일부는 sapphire 기관 등 주변의 물질로 전달된다(좌변 셋째항) 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. 실험치를 p 와 g 를 파라미터로 하여 위 식 (3)에 맞춘 결과를 그림 9에 보였다. 실험치가 대체로 식 (3)에 잘 맞음을 볼 수 있다. 실험치가 다소 흩어져 있는 것은 YBCO 박막의 임계전류 분포가 부분적으로 불균일한 때문으로 생각된다. 파라미터 중 g 는 비저항이 액체질소에 의한 냉각에 영향을 받는 범위, 즉 냉각이 침투하는 깊이의 역수에 해당한다. 실험치를 위 식에 가장 잘 맞춘 g 의 값은 4" 소자의 경우 600 V(4.2 V/cm) 및 350 V(2.4 V/cm)에서 각각 0.40(0.07)/mm, 0.22(0.02)/mm이고, 2" 소자의 경우 150 V(3.6 V/cm) 및 100 V(2.4 V/cm)에서 각각 0.31(0.04)/mm, 0.20(0.03)/mm이었다. 괄호 안의 숫자는 오차 범위이다. g 의 값은 대략 0.3/cm로 냉각 침투 깊이는 약 3 mm 가량이다. 다시 말하면 초전도 한류소자 가장자리의 3 mm 정도가 액체질소에 의해 냉각되어 비저항이 감소하고 나머지 구역은 균일하다. 냉각 침투 깊이는 한류소자의 크기에는 영향을 받지 않고 인가전압이 증가함에 따라 감소하였다. 실험치를 가장 잘 맞춘 p 의 값은 4" 소자의 경우 600 V(4.2 V/cm) 및 350 V(2.4 V/cm)에서 각각 0.28(0.05), 0.29(0.02)이고, 2" 소자의 경우 150 V(3.6 V/cm) 및 100 V(2.4 V/cm)에서 각각 0.31(0.03), 0.28(0.02)로 오차범위 내에서 비슷한 것으로 나타났다.

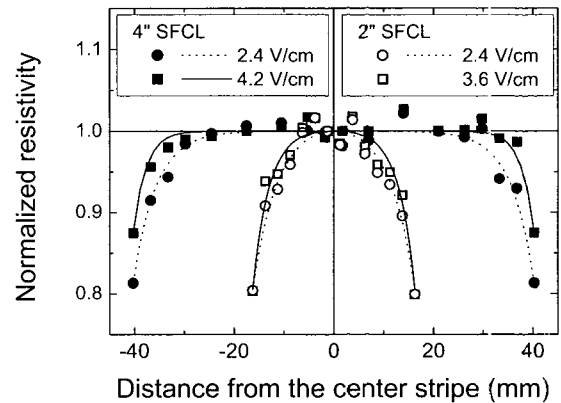


그림 9. 4" 및 2" 초전도 한류소자의 정규화한 비저항 및 식 (3)에 맞춘 곡선. 사고 후 88 밀리초(6째 주기). 파라미터 p 및 g 의 값은 본문에 있다.
 Fig. 9. Normalized resistivity of a 4" and a 2" SFCLs at 88 msec(6th cycle) after the fault, and fits to Eq. (3). See the text for the values of parameters p and g .

4. 결 론

직경 4" 초전도 한류소자에서의 저항분포를 측정하였다. 저항은 가장자리를 제외한 전역에서 균일하였다. 이 현상은 실용적인 면에서 중요한데 모든 stripe이 동시에 켄치되면 켄치 시 발생하는 열이 4" 박막 전역이 고르게 부담하여 국소적으로 과열되지 않음을 의미한다. 인가전압이 낮을 때에는 비저항 값이 작았

고 초기에 동시퀀치되지 않았으며 비저항이 덜 균일하였다. 직경 2" 초전도 한류소자와 비교하여 단위길이당 인가전압이 비슷할 때에 비저항의 값과 시간에 따른 변화가 비슷하였다. 소자 가장자리의 비저항 구배는 2" 소자와 비슷하였으며 균일하지 않은 부분의 범위는 3 mm 가량이었다. 측정 결과는 한류소자에서 주위로의 열전달 개념을 사용하여 정량적으로 설명하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[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. AS. Vol.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.

[5] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO films on sapphire substrates", IEEE Trans. AS. Vol.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. AS., Vol.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 Vol.41. pp. 275-280, 2001.

[8] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Resistance of superconducting fault current limiters based on YBCO thin films after quench completion.", Physica C (in press)

저 자 소 개



김혜림(金蕙林)
1957년 3월 15일생, 1979년 서울대 자연대 물리학과 졸업, 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 현재 한전 전력연구원 신에너지그룹.



현옥배(玄鉦培)
1953년 2월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(이학박사). 현재 한전 전력연구원 신에너지그룹.



최효상(崔孝祥)
1966년 2월 21일생, 1989년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한전 전력연구원 신에너지그룹.



차상도(車相道)
1973년 3월 29일생, 1999년 충남대 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 한전 전력연구원 신에너지그룹.