

# Resistance development in Au/YBCO thin film meander lines during quench

## 금/YBCO 박막에서의 quench 저항 발생

Hye-Rim Kim<sup>a</sup>, Hyo-Sang Choi<sup>a</sup>, Hae-Ryong Lim<sup>b</sup>, In-Seon Kim<sup>b</sup> and Ok-Bae Hyun<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Korea Electric Power Research Institute.

<sup>b</sup> Korea Research Institute of Standards and Science.

### Abstract

We investigated resistance development in Au/YBCO thin film meander lines during quench. The meander lines were fabricated by coating YBCO films insitu with a gold layer and patterning them by photolithography. The center stripe quenched fastest even though the flux flow resistance that appeared upon the current passing the critical current was uniform. Quench started at an area of the center stripe and propagate both through the gold layer and the sapphire substrate. Quench propagation speed was uniform and 60 cm/s at 30 V<sub>rms</sub>.

*Keywords:* YBCO, quench, fault current limiter

### I. 서론

초전도체는 전력계통의 보호와 안정에 쓰이는 한류기의 이상적인 조건을 모두 만족한다. 이러한 이유 때문에 초전도 한류기에 관한 연구가 독일의 Siemens AG 그룹[1,2] 등에서 활발히 진행되고 있다. 초전도 한류기를 연구개발하는데 있어서 quench(전류가 임계전류를 넘었을 때 저항이 급격히 발생하는 현상)에 관한 연구가 필요한데 이 특성이 초전도 한류기의 성능을 결정하기 때문이다. 더욱이 quench 특성은 케이블, 변압기와 같은 다른 초전도 기기의 안정성에도 큰 영향을 미친다. 이 때문에 저온초전도체의 quench 특성에 관한 연구는 많이 수행되어 온 반면, 고온초전도체의 quench 특성에 관한 연구[3-4]는 많이 되지 않았다. 특히 quench의 mechanism을 밝히는데 중요한 초기의 저항 발생에 관한 연구가 되

어있지 않다.

본 연구의 목적은 Au/YBCO 박막 meander line에서의 quench 초기의 저항 발생에 관한 연구를 하여 quench mechanism을 밝히는데 있다. 이를 위하여 YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (YBCO) 박막으로 폭 1 mm 길이 26 cm의 meander line 1쌍을 제작하여 quench 초기에 발생한 저항에 대해 조사하였다.

### II. 실험

Meander line을 직경 2 인치의 sapphire 기판 위에 성장된 두께 0.3 μm의 YBCO 박막을 바탕으로 제작하였다. YBCO 박막은 독일 Theva사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 3 MA/cm<sup>2</sup>이며, 임계전류는 직경 2" 박막 전역에서 ± 10 % 이내로 균일하였다. YBCO 박막의 표면을 주변의 수분으로

부터 보호하기 위하여 YBCO 박막 성장 직후에 insitu로 0.2  $\mu\text{m}$  두께의 금 박막을 증착하였다. 금박막은 YBCO의 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 한 쌍을 식각하였다. 제작한 meander line 쌍은 아래 그림 1과 같다 (흰 부분이 식각된 부분).

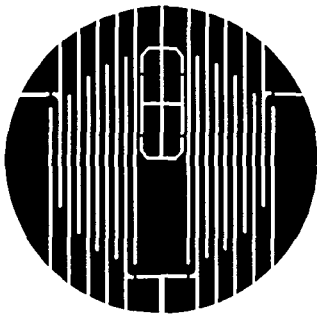


그림 1. Au/YBCO meander line pattern

제작한 meander line을 사용하여 저항 발생 측정 실험을 수행하였으며 실험 장치는 그림 2와 같다.  $V_0$ 는 전원전압,  $R_0$ 는 회로의 전류를 측정하고 회로를 보호하기 위한 저항이다. 과도전류는 스위치  $S_2$ 를 닫아 발생시켰는데 5주기에 스위치  $S_1$ 을 오픈으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였다. 전원전압을 변화시켜 과도전류의 크기를 조절하였다. Meander line을 구성하는 stripe의 저항은 stripe 양단에 부착한 voltage tap을 사용하여 4 단자법으로 동시에 측정하였다

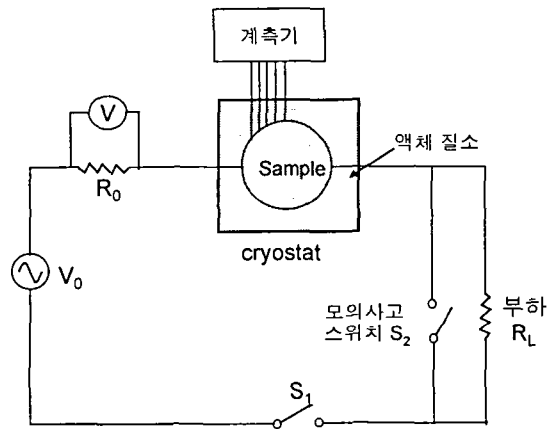


그림 2. Quench 특성 측정 회로  
III. 결과 및 토의

그림 3(a)는  $V_0 = 11.7 V_{rms}$ 일 때의 각 stripe의 평균비저항을 나타낸다. 여기서 평균비저항은 각 stripe의 단위 길이 당 저항 값에 단면적 ( $0.5\mu\text{m} \times 1 \text{ mm}$ )을 곱한 값이다. Data 점을 쉽게 구분해 볼 수 있도록 9개의 stripe 중 1, 3, 5, 7, 9번 stripe(가장자리 전극에서 첫번째 stripe가 1번 stripe)에 대한 값만 그래프에 나타내었다. 첫 반주기에 나타난 저항은 전류가 임계 전류를 넘었을 때 초전도체에 발생하는 flux flow 저항으로 1번부터 9번까지 stripe 전체에 동시에 나타났으며 그림 3(a)에 의하면 평균비저항의 크기가 균일하였다. 이는 그림 3(c)의 전류-전압 특성에 나타난 바와 같이 각 stripe의 임계전류가 같은, 다시 말하면 YBCO 박막의 임계전류밀도가 균일한 데에서 나온 결과이다. 두 번째 반주기에 들어서부터는 flux flow 저항의 크기가 첫번째보다 전체적으로 증가하였는데 이는 flux flow 저항으로 인하여 Joule 열이 발생하여 초전도체의 온도가 증가하고 이에 따라 저항이 증가한 것이다. 특이한 점은 저항이 증가하였을 뿐 아니라 불균일해졌다는 점이다. 5번 stripe, 즉 가운데의 stripe의 평균비저항이 다른 stripe보다 빠르게 증가하였고 그 다음에 옆에 있는 3번과 7번 stripe의 평균비저항이 빠르게 증가하였다. 각 stripe의 저항이 불균일해진 것은 참고문헌[5]에서 보인 바와 같이 전극에 의한 냉각에 기인한다.

다섯 번째 반주기에는 가운데 stripe 의 저항이 급격히 증가(quench)하였고, 3번과 7번 stripe 의 저항이 그 뒤를 이었으며, 1번 stripe 은 9번째 반주기에야 그리고 9번 stripe 은 측정 시간 내에 저항이 발생하지 않았다. 저항의 크기로 보아 이는 stripe 일부의 온도가 임계온도(87 k)를 넘어 초전도체가 S-N 전이를 하여 일어난 것으로 생각된다. 3, 5, 7번 stripe 에서는 flux flow 저항으로 생긴 Joule 열로 인해 초전도체의 온도가 임계온도 이상으로 증가하여 quench 한 것으로 본다.

1번 stripe 의 경우는 다른데 flux flow state 에서의 온도가 높지 않은데다 초전도체로 돌아가 있었던 동안 냉각되어 온도가 더욱 낮아졌으리라 예상되고 저항이 발생한 시점의 전류가 임계전류보다 낮으므로(그림 3(b)) flux flow 저항마저 없어 자체적으로는 1번 stripe 의 온도가 임계온도 이상으로 오를 수 없다. 이럼에도 불구하고 저항이 발생한 것은 외부에서 열이 유입된 때문이다. 열의 근원은 먼저 quench 하여 많은 Joule 열이 발생한 옆 stripe 으로 추측할 수 있다. 옆 stripe 에서의 열의 유입 경로는 금 박막과 사파이어 기판 두 가지를 생각할 수 있다. 1번 stripe 에서 저항이 발생한 8번째 반주기에서의 3번 stripe 의 평균비저항은  $1.1 \mu\Omega \text{ cm}$  로 quench 가 완료된 때의 평균비저항, 즉 임계온도 바로 위에서의 Au/YBCO 박막의 평균비저항  $3.5 \mu\Omega \text{ cm}$  보다 작다. 다시 말해서 3번 stripe 전역이 quench 되기 전에 1번 stripe 일부에서 quench 가 시작되었다. 이는 열이 사파이어 기판을 통하여 1번 stripe 으로 열이 전달되었음을 말해준다.

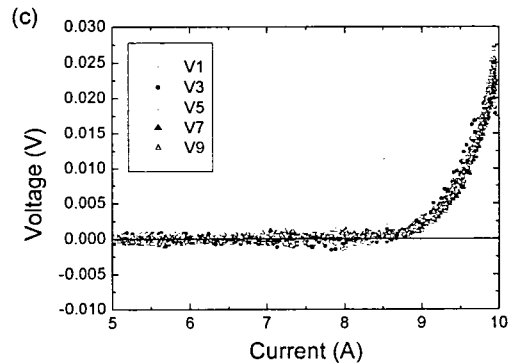
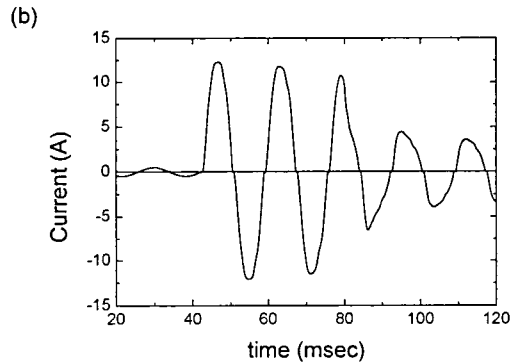
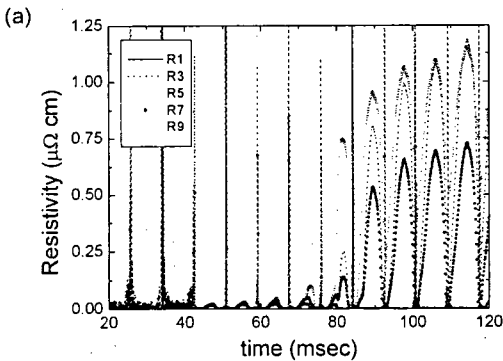


그림 3. 전원 전압  $11.7 V_{rms}$ 에서의 저항 발생  
(a) 평균비저항, (b) 전류, (c) I-V 특성

그림 4(a)와 (b)는  $30 V_{rms}$ 에서의 각각 meander line stripe의 저항과 비저항을 나타낸다. 앞에서와 같이 5번 stripe이 가장 먼저 저항이 급격히 증가(quench)하였으나 앞에서와 달리 모든 stripe에서 1 주기 내에 quench가 시작되었다. Quench가 시작된 후 저항은 전 stripe에서 동일한 비율로 증가하였다. 이로 인해 quench가 시작된 5번 stripe(길이 3.1 cm)에서보다 가장 짧은 1번 stripe(1.9 cm)에서 가장 먼저 quench가 완료되어 저항의 증가가 둔화하였다. 이 측정 결과로부터 quench가 5번 stripe의 한 지점에서 시작하여 전파된 것으로 짐작할 수 있다. 만약 quench가 5번 stripe의 여러 점에서 시작하여 전파되었다면 5번 stripe에서 먼저 quench가 완료되었을 것

이다. 그리고 이 결론은 다음의 관측 결과와도 일치한다. Quench된 부분에서 발생한 열의 일부는 주변의 액체질소로 전달되고 이 열이 액체질소를 기화시켜 기체질소 기포가 발생하는데  $11.7 V_{rms}$ 일 때 5번 stripe의 가운데 부분에서만 작은 기포가 발생하고  $30 V_{rms}$ 일 때는 거의 전역에서 기포가 발생한다. 그림 4(a)에 의하면 저항 증가 속도는  $90 \Omega /s$ 이었는데 이는  $60 \text{ cm/s}$ 의 퀀치 전파속도에 해당한다.

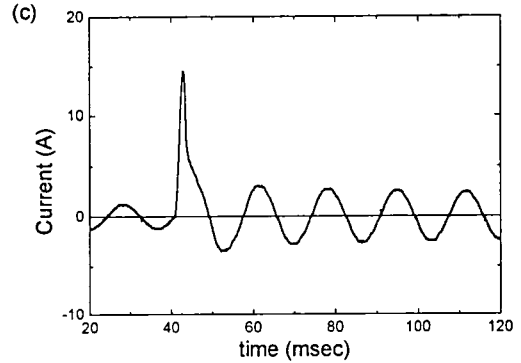
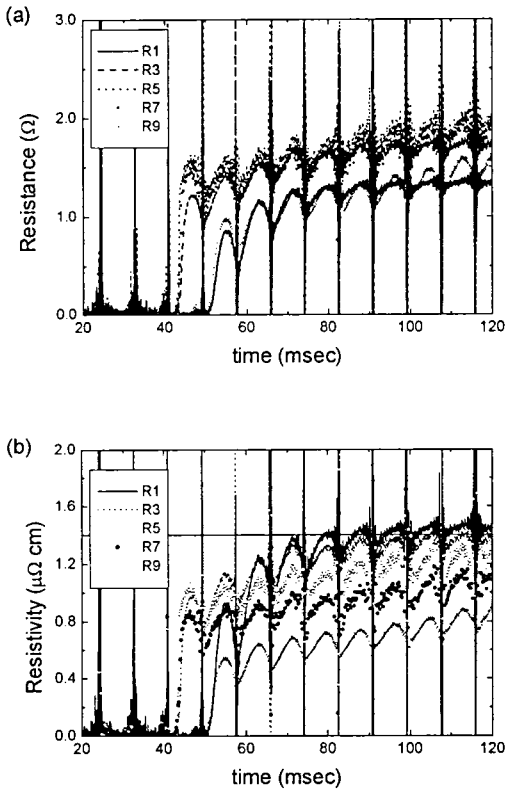


그림 4 전원 전압  $30 V_{rms}$ 에서의 저항 발생  
(a) 저항, (b) 평균비저항, (c) 전류

#### IV. 결론

Au/YBCO 박막 meander line의 quench 초기 저항을 각 stripe 마다 측정하였다. Flux flow 저항은 균일하게 meander line 전역에서 균일하게 발생하였으나 전극에 의한 냉각으로 인해 가운데 stripe이 먼저 quench되었다. Quench는 가운데 stripe의 한 구역에서 시작하였으며 주로 사파이어 기판을 통하여 옆의 stripe으로 전파되었고 quench 전파속도는  $30 V_{rms}$ 에서  $60 \text{ cm/s}$ 로 균일하였다.

#### 감사의 글

본 연구의 일부는 과학기술부의 중점국가연구개발사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고문헌

- [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(1998).
- [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, 1021-1023 (1997)

- [3] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current Limiting Properties of YBCO-Films on Sapphire Substrates", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, 1369-1372 (1999)
- [4] V. S. Vysotsky et al., "Quench Propagation in Large Area YBCO Films", IEEE Trans. Appl. Superc. 9, 1089-1092 (1999).
- [5] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시들, 김상준, 임해용, 김인선, "저항형 초전도 한류기에서의 위치에 따른 quench 진행 변화, 한국초전도저온공학회 2000년도 학술대회, 139-142 (2000).