

선트박막 두께에 따른 박막형 초전도 한류소자의 켄치특성

김혜림, 이승엽, 차상도, 최효상, 현옥배
한전 전력연구원

Quench characteristics of thin film type SFCLs with shunt layers of various thickness

Hye-Rim Kim, Seung-Yup Lee, Sang-Do Cha, Hyo-Sang Choi, Ok-Bae Hyun
Korea Electric Power Research Institute

hrkim@kepri.re.kr

Abstract - We investigated the quench characteristics of thin film type SFCLs with shunt layers of various thickness. The SFCLs were based on 2 inch diameter $YBa_2Cu_3O_7$ thin films coated in-situ with a gold shunt layer. The shunt layer thickness was varied by Ar ion milling. The limiters were tested with simulated fault currents at various source voltages. The thinner the shunt layer was, the slower was the rise of SFCL temperatures. This means SFCLs of thinner shunt layers had higher voltage ratings. The voltage rating was approximately inversely proportional to the square root of the shunt layer thickness. This result could be understood through the concept of heat balance.

1. 서 론

저항형 초전도 한류기는 초전도체에 임계전류보다 높은 전류가 흐를 때 큰 저항이 발생하는 (켄치) 성질을 이용한 새로운 개념의 전력기기이다. 구조와 원리가 간단한 장점이 있어 스위스의 ABB[1], 독일의 Siemens AG[2], 일본의 도시바[3] 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 이제 기초적인 연구단계를 넘어 실증시험을 하면서 현장 적용을 위하여 노력하고 있다. 초전도 한류기의 실용화를 이루려면 크기를 작게 하고 제작비용을 줄이는 것이 필요하다. 이를 위해서는 단위 한류소자의 용량을 늘리는 것이 급선무이다. 단위 소자의 용량이 커야 초전도 한류기를 구성하는데 필요한 단위소자의 수가 줄어들어 한류기의 크기가 작아지고 조립이 용이해지며 제작비용이 줄어들게 된다.

본 연구의 목적은 선트박막의 두께가 다른 초전도 한류소자의 켄치 특성을 조사하여 단위 한류소자의 용량증대를 꾀하는 데에 있다. 이를 위하여 선트박막의 두께를 Ar ion milling으로 변화시켜서 켄치 특성을 조사하였다.

2. 실험

저항형 초전도 한류소자를 직경 2인치 두께 300 nm의 $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 사용하여 제작하였다. YBCO 박막은 sapphire 기판 위에 성장된 것으로 독일 Theva 사에서 구입하였다. 박막의 임계온도와 임계전류는 각각 87 K와 2.5 MA/cm²이었다. YBCO 박막을 공기 중의 수분으로부터 보호하고 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 분산시키거나 우회시키기 위하여 YBCO 박막 성장 직후 in-situ로 금 선트박막을 증착하도록 하였다. 금이 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 meander line 모양으로 식각하였다. 한류소자의 pattern은 아래 Fig.1과 같다(흰 부분이 식각되는 부분이다). 금 선트박막의 두께는 200 nm 두께로 증착한 선트박막을 Ar ion milling으로 식각하여 변화시켰다. 이 방법으로 동일한 YBCO 박막을 사용하면서 선트 박막의 두께를 변화시킬 수 있었다. 식각 전후에 전류-전압 특성을 측정하여 YBCO 박막의 초전도성이 Ar ion milling에 영향을 받지 않음을 확인하였다.

사고 모의 회로를 사용하여 선트박막의 두께가 다른 초전도 한류소자의 특성을 측정하였다. 전원은 교류전원을 사용하였고 부하양단에 병렬로 연결된 스위치를 닫아 사고를 모의하였다. 차단기가 보통 5 주기에 작동하는 점을 고려하여 5~8 주기에 회로 스위치를 옴으로써 초전도체를 불필요하게 과도전류에 노출시키지 않도록 하였고, 과도전류의 크기는 전원전압을 변화시켜 조절하였다. 처음에 두께 200 nm 소자의 켄치특성을 측정한 후, Ar ion milling으로 약 50 nm 식각하고 켄치특성을 측정한 다음 이를 반복하였다. 식각 후 선트박막의 두께는 초전도 한류소자의 상온저항으로부터 추정하였다. 켄치 시 초전도 한류소자의 냉각효율을 높이기 위하여 한류소자가 액체질소에 담그어 있는 상태에서 실험하였다.

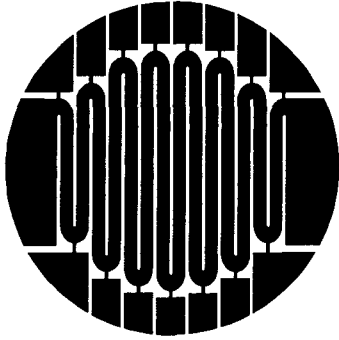


Fig. 1. The thin film SFCL pattern

3. 결과 및 토의

Fig.2(a), (b), (c)에 셉트 박막의 두께가 각각 200, 93, 43 nm일 때의 초전도 한류소자의 쉐인트 저항을 상온저항 값(각각 35.5, 53.0, 76.4, 166.6 Ω)으로 나누어 나타내었다. 셉트 박막의 두께가 다르면 비저항이 같더라도 저항이 달라지기 때문에 초전도 한류소자의 온도를 비교하기 위함이다. 한류소자의 쉐인트저항, 즉 온도는 이전의 실험 결과[4]에서와 같이 어느 경우에서나 전원전압이 증가함에 따라 증가했다. 셉트 박막 두께 200 nm인 경우 전원전압 100, 150, 180, 220 V에서 사고 후 5주기에 각각 157, 205, 234, 271 K에 도달했다. 이에 비해 93 nm에서는 120, 180, 220, 260 V에서 각각 146, 178, 204, 231 K에 이르는 것으로 그쳤다. 즉, 같은 전압 180, 220 V에서 200 nm의 경우 각각 234, 271 K에 이르던 것이 93 nm의 경우 178, 204 K로만 올랐다. 이는 한류소자의 전압용량 측면에서 중요한 의미를 가진다. 한류소자의 정격전압의 기준을 소자의 평균 온도가 사고 후 5주기에 230 K 이하가 되는 전압으로 정한다면, 셉트 박막 두께 200 nm의 경우 정격전압이 180 V이고 93 nm의 경우 정격전압이 260 V가 되는 것이다. 이는 약 44 %의 전압용량 증대를 의미한다. 셉트박막의 두께가 43 nm 경우는 온도의 증가가 더욱 적어 400 V에 230 K에 이르는 것으로 그쳤다.

Fig.3에 초전도 한류소자의 온도가 사고 후 5주기에 230 K에 이르는 경우에 대한 쉐인트특성을 보였다. 셉트박막 두께 200, 134, 93, 43 nm에 대해 인가전압이 각각 180, 220, 260, 400 V일 때 사고 후 5주기에 230 K에 이르렀다. 다시 말하면 전압용량의 기준을 위에서와 같이 정한다면 초전도 한류소자의 전압용량은 각각 180, 220, 260, 400 V가 된다. 전류를 보면 초기 peak 값은 모두 비슷하고, 셉트박막의 두께가 얇을수록 한류가 많이 되었다. 이는 셉트박막이 얇을수록 저항이 크게 발생하여 높은 전원전압이 인가되었음에도

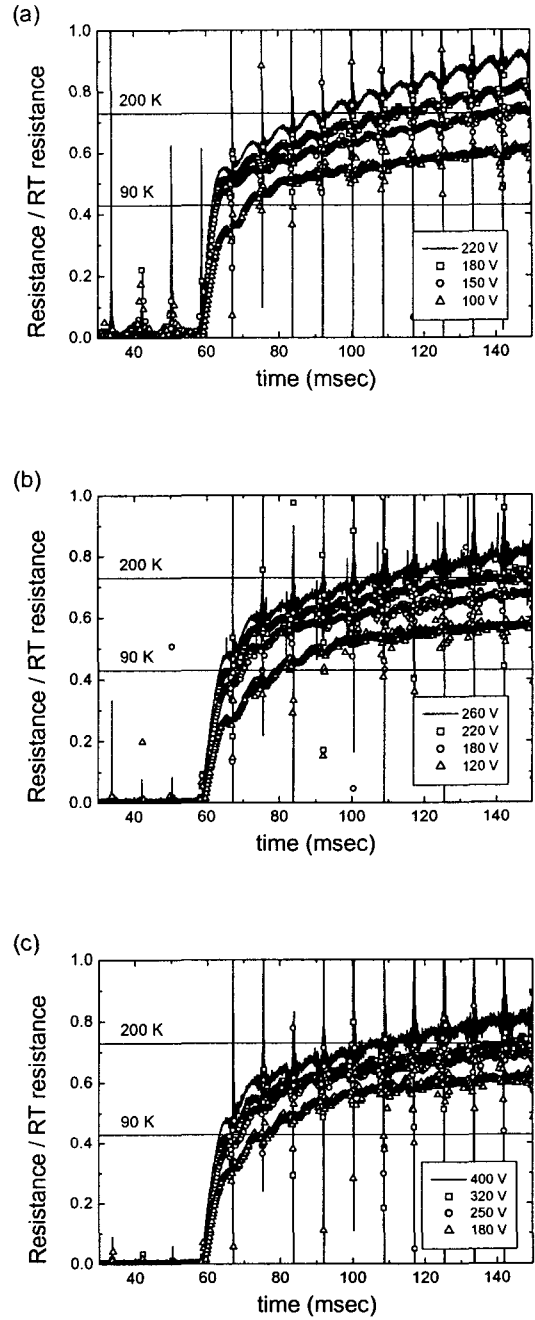


Fig. 2. Resistance of an SFCL at various source voltages. Normalized with room temperature resistance. Shunt layer thickness: (a) 200 nm, (b) 93 nm, and (c) 43 nm.

불구하고 전류가 더 줄어든 것이다. 그 결과 쉐인트로 발생된 열은 셉트박막의 두께에 관계없이 일반적으로 서로 비슷하게 되었고, 초전도 한류소자의 온도 상승 또한 비슷하게 되었다.

셉트박막의 두께와 초전도 한류소자가 일정한 온도에 이르게 되는 인가전압 간의 관계를 명확히 보기 위하여 Fig.4(a)에 인가전압을 셉트박막의 함수로 보였다. 인가전압은 셉트박막이 얇아짐에 따라 체계적으로 증가함을 볼 수 있다.

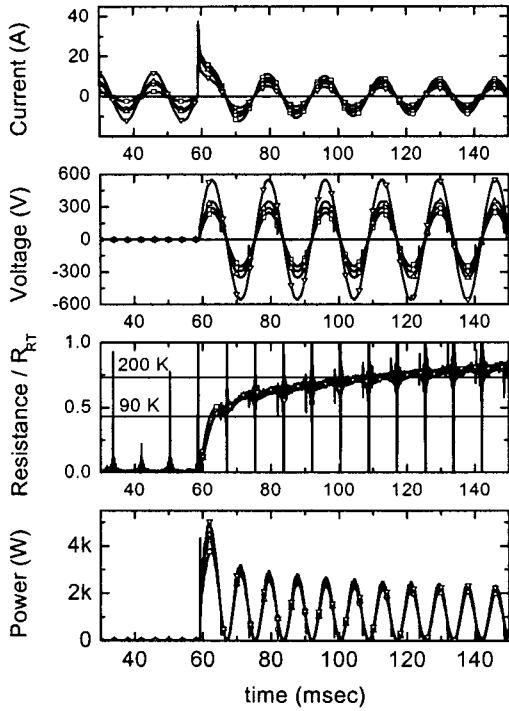


Fig. 3. Quench characteristics of an SFCL for various shunt layer thickness at source voltages at which the SFCL temperature reached 230 K at 5 cycles after the fault. Lines with squares, circles, upward and downward arrows are for 200 nm/180 V, 150 nm/220 V, 100 nm/260 V, and 50 nm/400 V, respectively.

Fig.4(b)는 Fig.4(a)의 data를 log-log 눈금에 나타낸 것인데, data가 대략 직선 위에 놓임을 볼 수 있다. Fig.4(b)에 있는 선들은 data를 직선에 맞춘 결과인데, 기울기가 180, 200, 230 K에 대해 각각 $-0.41(0.04)$, $-0.47(0.04)$, $-0.52(0.02)$ 로 대략 -0.5 이다(괄호 안은 오차). 다시 말하면 인가전압은 셉트 박막의 두께의 제곱근에 반비례한다. 셉트 박막의 두께가 반으로 줄면 인가전압은 $\sqrt{2}$ 배로 증가하고, 1/4로 줄면 인가전압은 2배로 증가한다.

위 측정 결과를 다음과 같이 이해할 수 있다. 켈치로 발생한 열은 초전도 한류소자의 온도를 상승시키는데, 아래 (1)의 열균형 방정식을 사용하여 수식적으로 설명할 수 있다. 방정식에서 C 는 열용량, G 는 액체 질소로의 열전달 계수, T_b 는 액체질소의 온도, K 는 열전도도이다. 켈치로 발생한 열 P (우변)는 일부가 주변의 액체질소로 손실되고(좌변 둘째 항), 일부는 sapphire 기판 등 주변의 물질로 전달되며(좌변 셋째 항), 나머지 열이 박막의 온도를 증가시킨다(좌변 첫째 항).

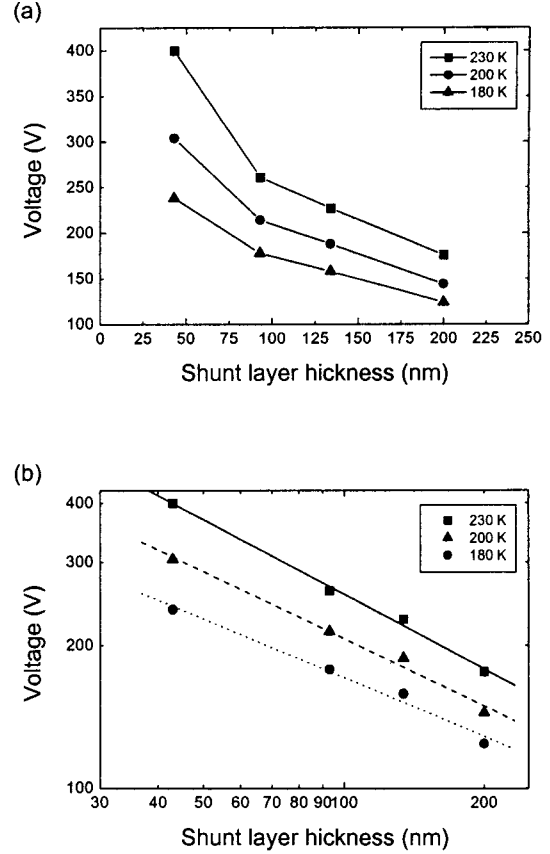


Fig. 4. Shunt layer thickness dependence of source voltages at which the SFCL temperature reached the values listed in the legend at 5 cycles after the fault. (a) On a linear scale (Lines are for guiding eyes only), and (b) on a log-log scale (Lines are linear fits).

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

좌변의 계수 G 는 표면적에 비례하므로 셉트 박막의 두께와 무관하고, 계수 C 와 K 또한 셉트 박막 두께의 영향을 별로 받지 않는다. 켈치열이 충분히 많이 발생하는 경우에는 열이 박막 뿐 아니라 기판까지 전달되므로(5) 상대적으로 부피가 작은 셉트박막은 전체 C 와 K 에 별 영향을 미치지 못한다. 따라서 켈치열이 충분히 많이 발생하여 기판에까지 전달되는 경우에 초전도 한류소자의 온도는 켈치열의 양에 의해 결정된다.

켈치열은 아래와 같이 셉트박막 두께의 함수로 표시된다. 방정식에서 w , ρ , l , d , V_0 는 각각 셉트박막의 폭, 비저항, 길이, 두께, 인가전압이다.

$$P = (w/\rho l) d V_0^2 \quad (2)$$

이 식을 다시 정리하면 (3)과 같이 된다. 일정한

온도에서 P 와 ρ 는 일정하므로 인가전압 V_0 는 선트박막의 두께 d 의 제곱근에 반비례하게 된다.

$$V_0 = (P\rho l/w)^{1/2} d^{-1/2} \quad (3)$$

4. 결 론

선트박막의 두께가 다른 초전도 한류소자의 퀘치특성을 조사하였다. 두께가 얇을수록 동일한 전원전압을 인가하였을 때 소자의 온도상승이 둔화하였다. 이는 한류소자의 전압용량의 기준을 사고 후 5 주기에 230 K에 이르는 전원전압으로 정하였을 때 선트 박막의 두께가 얇을수록 전압용량이 커진다는 것을 의미하여, 단위 한류소자 용량 증대 측면에서 중요한 의미를 가진다. 전압용량은 대략 선트박막 두께의 제곱근에 반비례하고 이는 열균형 개념으로 설명할 수 있다.

감사의 글

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

(참 고 문 헌)

- [1] M. Chen et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi-2212 superconductor", Physica C, 372-376, pp.1657-1663, 2002.
- [2] H.-P. Kraemer et al., "Switching behavior of YBCO thin film conductors in resistive fault current limiters", Appl. Superc. Conf. 2002, Houston, USA, paper 4LE05.
- [3] Y. Kudo et al., "Improvement of maximum working voltage of resistive fault current limiter using YBCO thin film and metal thin film", Physica C, 372-376, pp.1664-1667, 2002.
- [4] 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.
- [5] Hye-Rim Kim, Hyo-Sang Choi, Hae-Ryong Lim, In-Seon Kim and Ok-Bae Hyun, "Resistance of superconducting fault current limiters based on YBa₂Cu₃O₇ thin films after quench completion", Physica C, 372-376, pp. 1606-1609, 2002.