

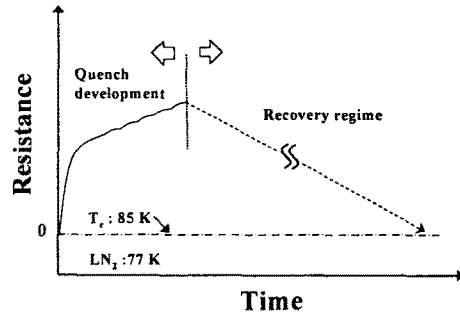
## YBCO 박막형 초전도 한류소자의 켄치 회복 특성에 관한 연구

임성우, 심정욱, 김혜림, 현옥배, 김호민, 박권배, 이방욱, 오일성  
한전전력연구원 전략기술연구소 초전도그룹, 고려대학교, LS 산전

### Quench recovery characteristics of YBCO thin film type superconducting fault current limiter

Seong-Woo Yim, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Ok-Bae Hyun, Ho-Min Kim, Kwon-Bae Park, Bang-Wook Lee, Il-Sung Oh  
Korea Electric Power Research Institute, Korea University, LS Industrial Systems

**Abstract** - For the application of superconducting fault current limiters (SFCLs) to the protection system, quench recovery characteristics of Au/YBCO thin film were investigated. The Au/YBCO thin film was designed as a SFCL element with a bi-spiral pattern. The SFCL element limited the fault current successfully. For the analysis of the recovery to superconducting state, we measured resistance variation of the SFCL element after the quench. In addition, in order to investigate the dependence of quench characteristics of SFCL on the LN<sub>2</sub> cooling condition, we measured the recovery time under a pressure of 1, 2 and 3 atm. As the results, the recovery time increased in proportion to the duration of the fault currents. In the sub-cooled condition, while the quench development was exactly the same, the recovery time was shortened as the pressure increased.



〈그림 1〉 초전도체의 켄치 거동 및 회복 특성 개념도

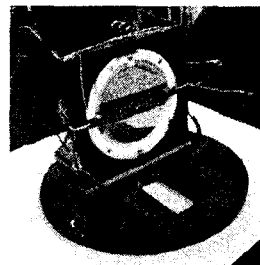
## 1. 서 론

초전도 한류기는 초전도체의 초전도-상전도 상태 전환에 의한 고 에너지 스위칭 작용을 이용한 전력 기기이다. 정상 동작 상태에서는 초전도체 고유의 영저항 특성에 의해 줄열의 발생 없이 대 전류를 통전하지만, 단락사고가 발생하는 경우, 초전도체가 고속으로 상전도 상태로 전환되며 고 임피던스를 발생하여 한류 동작을 수행한다. 더불어 사고전류가 완전히 차단된 이후 한류 중 발생한 줄열이 제거되면 다시 스스로 초전도 상태로 복귀하여 정상 상태 동작을 수행한다. 한편, 이러한 초전도 한류기가 계통에 적용되기 위해서는 차단기 등의 타 보호 기기와의 적절한 협조가 이루어져야 한다. 이를 고려할 때, 한류 후 다시 초전도 상태로 복귀하기까지 소요되는 시간은 보호 협조 시스템 구성을 위한 주요 설계요소가 된다. 초전도체의 저항이 급격히 증가하여 (quench) 전류를 제한한 이후 정상상태로의 회복 시간은 초전도체 고유의 물리적 특성과 초전도 한류기의 형상 그리고 주변 환경 조건에 따라 다르게 나타난다 [1]. 그림 1은 초전도 한류기의 동작에 따른 켄치 거동 변화를 나타낸 개략도이다. 그림과 같이 단락사고가 발생하였을 때, 초전도체의 저항이 급격히 증가하면서 사고전류를 제한하지만, 전류가 차단된 이후 정상상태로 복귀하기 위해서는 다시 임계온도(Tc) 이하로 복귀하여 정상 전류 통전 중 저항이 영이 되어야 한다. 본 연구에서는 초전도 한류기의 주요 재료로써 관심을 끌고 있는 YBCO 초전도 박막에 대한 켄치 후 회복 특성을 조사하여 향후 한류 소자로써 응용에 적용하고자 하였다. 우선, 사고 전류 인가 후 발생하는 저항 증가를 조사하고 사고 전류 차단 이후 저항에 의해 발생한 줄열이 제거되기 위해 소요되는 시간을 측정하였다. 또한 초전도체의 냉매인 액체 질소의 77 K 과냉 조건을 달리하여 켄치 후 회복 시간을 측정하고 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

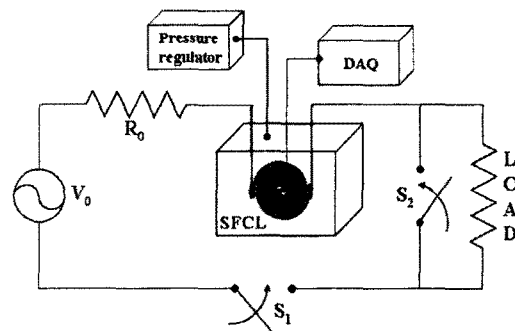
본 연구를 위해 지름 4 인치의 원형 사파이어 기판 위에 YBCO 초전도체가 박막 형태로 증착된 초전도 한류 소자가 사용되었다. 그림 2와 같이 초전도체의 표면은 켄치 시 소자의 안정성을 도모하기 위하여 금층으로 코팅되었다. 또한, 통전 시 교류 손실, 한류 동작 중 자계의 균등 분포 등을 고려하여 Au/YBCO 박막의 통전 경로가 bi-spiral 형태의 패턴을 갖도록 설계되어 한류 소자로 제작되었다 [2]. 최종적으로 시험에 사용된 한류 소자는 48 A의 임계전류, 85 K의 임계온도를 가지며, 300 K의 상온에서 측정된 저항은 46 Ω으로 나타났다.

제작된 한류 소자의 한류 특성 및 켄치 후 회복 특성을 조사하기 위하여 그림 3과 같이 한류 소자와 사고 전류 인가 장치로 구성된 회로를 구성하였다. 정상상태에서 YBCO 박막은 77 K, 대기압 상태의 액체 질소에 의하여 냉각되었다. 전압원으로부터의 사고 전류는 R<sub>0</sub>를 통하여 조절되었고 사고전류 제어기의 S<sub>1</sub>과 S<sub>2</sub>의 투입시간에 따라 인가 시간이 제어되었다. 한편, 켄치 후 회복 시간을 측정하기 위하여 사고 전류가 회로에서 완전히 차단된 후, YBCO 박막에 존재하는 저항이 사라질 때까지의 시간을 측정하였다. 이를 위해 전압원으로부터의 전류 인가가 완전히 차단된 이후 초전도 박막을 통해 약 0.15 A<sub>rms</sub> (60 Hz) 정도의 작은 전류를 통전시켜 이 때 발생하는 전압을 검출하였다.



한류 소자	Au/YBCO/Sapphire substrate
설계 패턴	Bi-spiral
임계 전류 (1 μ/cm, @ 77 K)	48 (A)
임계 온도	85 (K)
상온 저항 (@ 300 K)	46 (Ω)

〈그림 2〉 YBCO 박막 한류소자의 형상 및 임계 특성



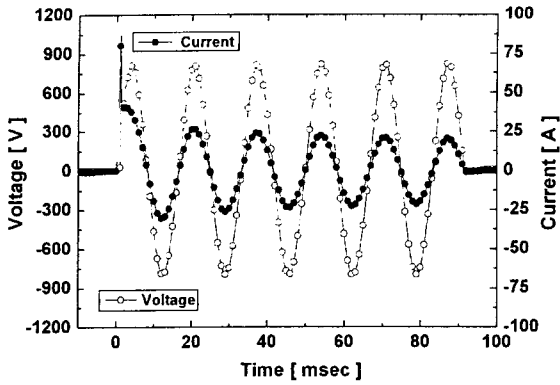
〈그림 3〉 한류 및 켄치 후 회복 시험 장치 구성

그림 1에 제시된 바와 같이 초전도체의 저항은 임계온도인 85 K에서 사라지므로 검출된 전압이 영이 되는때까지 소요된 시간을 측정하여 초전도체의 정상상태 회복 시간을 판단하였다. 한편, 77 K 과냉 상태의 액체 질소를 이용하여 초전도체 냉각 환경이 켄치 후 회복 시간에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 저온조 내의 액체 질소 압력을 각각 1 기압 및 2 기압 그리고 3 기압으로 조정하였고 각각의 조건 하에서 같은 방법으로 한류 소자의 켄치 특성과 켄치 후 회복 특성을 조사 분석하였다.

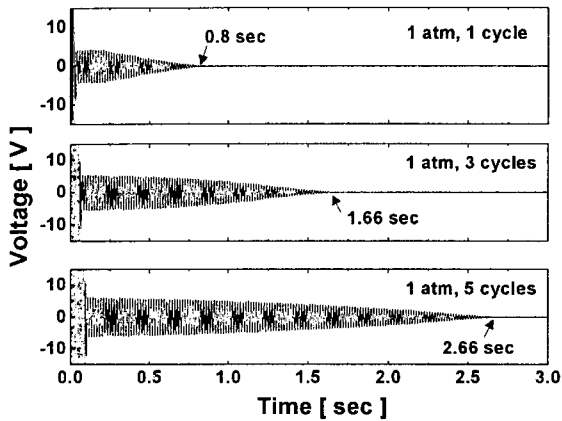
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 YBCO 박막의 켄치 특성

Au/YBCO 박막과 사고전류 시험장치로 구성된 그림 3의 회로에 V<sub>0</sub> = 600 V<sub>rms</sub>의 전압을 인가하여 초전도 박막의 한류특성을 조사하였다. 그림 4로부터 5 주기 동안의 사고 전류를 인가하였을 때, 인가된 사고 전류를 1/4 주기 이내에 성공적으로 한류하고 있음을 확인할 수 있다.



〈그림 4〉 YBCO 박막의 한류 특성 ( $V_0=600 V_{rms}/5$  주기, 대기압)

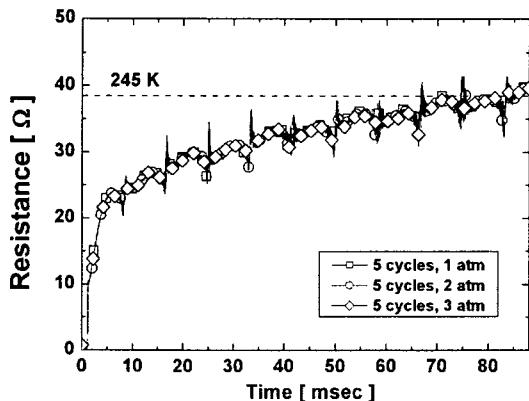


〈그림 5〉 대기압에서의 사고 전류 인가 시간에 따른 퀀치 후 회복 시간

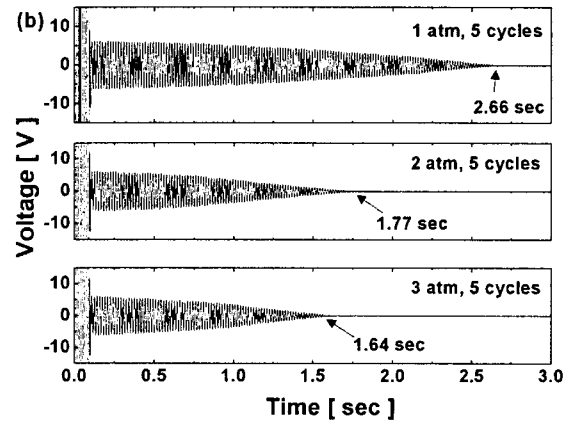
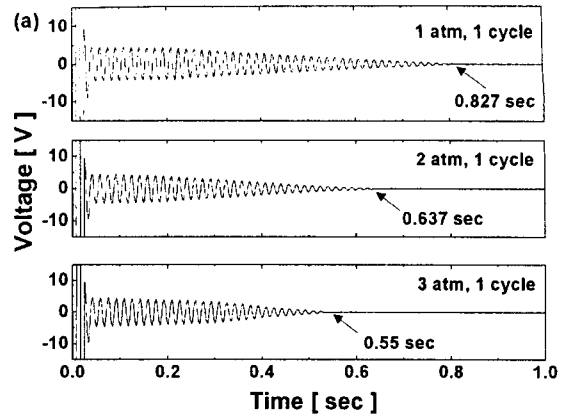
한편, 퀀치 종료 후 정상상태로 회복될 때 까지 소요되는 시간을 측정된 결과가 그림 5에 제시되어 있다. 사고 전류 인가 시간이 증가함에 따라 퀀치 후 회복 시간 또한 이에 비례하여 증가하고 있다고 판단할 수 있다.

### 3.2 기압 조건에 따른 퀀치 후 회복 특성

액체 질소의 온도를 77 K로 유지한 상태에서 액체질소와 한류 소자를 담고 있는 저온조 내부를 가압하여 각각 2 기압 그리고 3 기압으로 증가시켜 한류소자의 동작 조건을 변화시켰다. 사고 전류가 제한되는 동안, 급격히 발생하는 줄열에 의해 액체 질소는 기포를 형성하며 한류 소자인 초전도 박막 표면으로부터 증발한다. 그러나 액체 질소가 대기압 이상의 과냉 상태를 유지하고 있는 경우, 액체 질소의 열용량 증가에 기인하여 기포 발생에서의 열적 거동에 차이가 발생하므로 퀀치 특성과 퀀치 후 회복 특성에도 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그림 6은 각각의 기압 조건 하에서 5 주기 동안의 사고전류를 인가하였을 때, 한류 소자에서 발생한 저항 증가 추이를 나타내고 있다. 기압 조건이 달라졌지만 한류 특성은 조건에 관계없이 정확히 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 이로부터 초전도 한류소자의 퀀치 특성은 액체 질소의 기압 조건에 영향을 받지 않는다고 판단할 수 있다. 이때 발생한 저항은 5 주기 후 약 38.5 Ω 까지 증가하였으며, 초전도체 온도는 약 245 K 까지 증가하였다는 것을 의미한다.



〈그림 6〉 YBCO 박막의 퀀치 동작 시 기압 변화에 따른 저항 변화 ( $V_0=600 V_{rms}/5$  주기)



〈그림 7〉 기압 변화에 따른 퀀치 후 회복 시간 변화 (a) 1주기 사고 (b) 5주기 사고

그림 7에서 액체 질소를 각각 1, 2 그리고 3 기압의 77 K 과냉 상태로 변환하여 퀀치 후 회복 특성을 조사하였다. 한류 소자의 퀀치 특성이 기압 조건의 영향을 받지 않았던 것과 달리, 퀀치 후 회복 특성은 상당히 다른 경향을 보이고 있다. 대기압에서는 5 주기 동안 사고 전류를 인가한 경우, 약 2.6 초 이 후 초전도 박막에서 줄열이 사라지고 정상 상태로 복귀하였다. 그러나 2 기압으로 액체 질소의 압력을 증가시킨 경우, 퀀치 후 회복시간은 약 1.7 초로 상당히 단축되었고 3 기압으로 증가하였을 때, 회복 시간은 더욱 짧아져서 약 1.6 초 이내에 완전히 회복되는 경향을 보이고 있다. 액체 질소의 기압이 높아짐에 따라 한류 소자의 퀀치 후 정상상태 회복 시간은 점차 짧아지고 있으며, 특히 1 기압에서 2 기압으로 증가한 경우 회복 시간 감소가 빠르게 진행되었다.

## 4. 결 론

Bi-spiral 형태로 설계된 4 인치 크기의 Au/YBCO 박막을 이용하여 사고 전류 제한 후 퀀치 회복 특성을 조사하였다. 초전도 박막의 퀀치 후 정상상태 회복 시간은 사고 전류의 인가 시간이 길어짐에 따라 비례하여 증가하였다. 또한, 액체 질소의 과냉 상태 조건 변화에 따른 퀀치 후 회복 특성을 조사하였다. 그 결과, 액체 질소의 기압이 상승할수록 퀀치 후 회복 속도 또한 빨라지는 것을 확인하였다. 향후, 본 연구 결과는 초전도 한류기 개발 및 보호 시스템 적용을 위한 기반 연구 자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [ 참고 문헌 ]

- [1] H. R. Kim, H. S. Choi, H. R. Lim, I. S. Kim, and O. B. Hyun, "Resistance of superconducting fault current limiters based on  $YBa_2Cu_3O_7$  thin films after quench completion," *Physica C*, vol. 372-376, pp. 1606-1609, 2002
- [2] O. B. Hyun, H. R. Kim, J. Sim, Y. H. Jung, K. B. Park, J. S. Kang, B. W. Lee, and I. S. Oh, "6.6 kV resistive superconducting fault current limiter based on YBCO films," *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 15, no. 2, pp. 2027-2030, Jun. 2005