

## Fabrication and Fault Test Results of Bi-2212/Cu-Ni Tubes for Superconducting Fault Current Limiting Elements

S. Y. Oh<sup>a</sup>, S. W. Yim<sup>\*,a</sup>, S. D. Yu<sup>a</sup>, H. R. Kim<sup>a</sup>, O. B. Hyun<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Korea Electric Power Research Institute, Superconductivity & Applications Group, Daejeon, Korea

Received 4 July 2008

## Bi-2212/Cu-Ni 튜브로 제작한 초전도 한류소자의 단락사고시험 결과

오성용<sup>a</sup>, 임성우<sup>\*,a</sup>, 유승덕<sup>a</sup>, 김혜림<sup>a</sup>, 현옥배<sup>a</sup>

### Abstract

For the development of superconducting fault current limiters (SFCLs), fault current limiting elements were fabricated out of Bi-2212 bulk tubes and tested. The SFCL elements consisted of tube shaped Bi-2212 bulks and metal shunts for the stabilizers. Firstly, the Bi-2212 bulk tubes were processed based on a design of monofilament coils in order to acquire large resistance and high voltage rating. 300 mm-long Bi-2212 tubes were designed to have the current path of 410 cm in length with 24 turns and 41 mm in diameter. The processed monofilament coil, as designed, had 300 A  $I_c$  at 77 K. The fabricated superconducting monofilament coils were affixed to Cu-Ni alloy as that of stabilizers. The Cu-Ni alloys were processed to have the same shape of the superconducting monofilament coils. The Cu-Ni coil had resistivity of 32  $\mu\Omega$ -cm at 77 K and 37  $\mu\Omega$ -cm at 300 K. The metal shunts were attached to the outside of the Bi-2212 monofilament coil by a soldering technique. After the terminals made of copper were attached to both ends of the superconductor-metal shunt composite, the gap between the turns and the surface of the elements was filled with an epoxy and a dense mesh made of FRP in order to enhance the mechanical strength. The completed SFCL elements went through fault tests, and we confirmed that the voltage rating of 143  $V_{rms}$  ( $E = 0.35 V_{rms}/cm$ ) could be accomplished.

*Keywords* : Bi-2212, Cu-Ni metal stabilizer, monofilament coil, SFCL.

### I. Introduction

YBCO와 BSCCO로 대표되는 고온초전도체로

제작된 초전도 기기는 고 임계특성을 가지므로 경제적 운용이 가능할 것으로 기대되어 기기 성능 향상과 운전 효율 개선을 위한 연구 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 초전도체는 통전 손실이 거의 없어 대 전류 통전을 가능하게 하는 한편, 통전 전류, 인가 자계 및 주변 온도의 임계조건을

\*Corresponding author. Fax : +82 42 865 7804  
e-mail : yimsw@kepri.re.kr

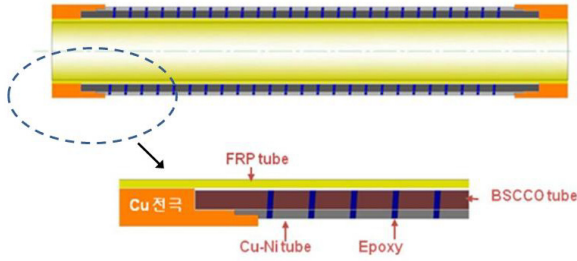


Fig. 1. Configuration of Bi-2212 tube type SFCL element.

만족하지 못하는 경우, 상전도 도체로의 상변화 속도 역시 매우 빠르다. 이러한 특성은 전력계통 보호를 위한 고장전류제한기술 관점에서 볼 때, 매우 유용한 조건을 제공할 수 있으며 이러한 특성을 활용한 초전도 한류기 연구 개발 역시 활발히 진행되고 있다. 전력수요가 늘어나면서 기존의 차단기 등 전력계통 보호기기가 감당할 수 있는 정격을 초과할 것으로 예상되는 반면, 전기 품질을 결정하는 계통 안정도 향상, 정전시간 단축 등의 필요성은 더욱 강조되고 있기 때문이다. 이러한 문제점을 가장 적절히 해결할 수 있는 대안이 초전도체를 이용한 한류기술이다.

초전도 한류소자 응용에 있어 이러한 초전도 재료는 적용 방식에 따라 박막, 선재, 벌크 등 다양한 형태로 제작된다 [1]. 특히 BSCCO 벌크는 고 임계전류를 갖는 대용량 한류기를 구현할 수 있고 박막 등의 소자에 비해 취급과 변형이 용이하여 제작 운용 면에서 장점을 가질 수 있다 [2].

이러한 장점을 고려하여 최근 한전에서는 Bi-2212 벌크와 Cu-Ni 금속 안정화재로 구성된 BSCCO 튜브형 한류소자를 제작하였다. 본 연구에서는 이러한 한류소자의 제작과정을 소개하고 고장전류 인가시험을 통한 성능 검증 결과를 제시하고자 한다.

## II. 제작 및 시험

제작에 사용된 초전도체는 튜브형태로 제작된 Bi-2212이며 독일 Nexans로부터 구입하여 사용하였다. 이를 설계 조건에 따라 가공하여 최종적으로 표 1에 제시된 조건을 갖는 한류소자를 제작

Table 1. Design parameters of the Bi-2212/Cu-Ni SFCL.

시료 크기	∅ 50 mm * L 300 mm
튜브 디자인	Monofilar coil
Bi-2212 tube 두께	4.5 mm
가공 턴 수	24
가공길이/가공선폭	410 cm / 1.4 mm
임계전류 $I_c$	300 A @ 77 K
Cu/Ni resistivity ( $\mu\Omega\text{-cm}$ )	32 (@77 K) ~ 37 (@300 K)

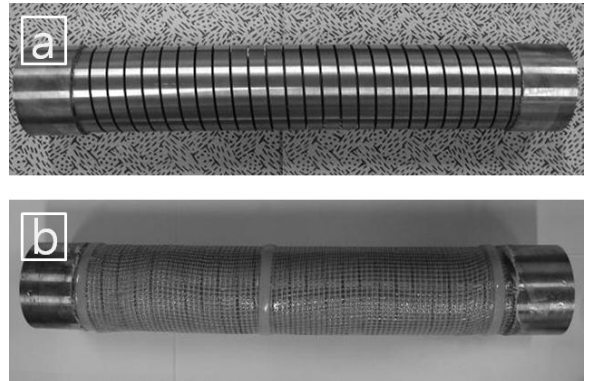


Fig. 2. a) Cu-Ni metal stabilizer which is processed to monofilar shape, b) A fabricated SFCL element.

하였다. 가공 전 초전도 튜브의 외경길이는 ∅ 50 mm \* L 300 mm이고 두께는 4.5 mm 이며, 임계전류는 4000 ~ 4500 A의 분포를 보였다.

한류 동작 중 초전도체에서 발생한 줄열에 기인한 과도한 온도 증가에 의한 파손 가능성이 존재한다. 또한 통전 경로 상에 예상치 못한 결함이 존재할 경우, 이 부분에 전계가 집중하게 되므로 이러한 문제점을 줄이기 위하여 안정화재의 적용이 요구된다. 이를 위하여 본 소자 제작에는 Cu-Ni 합금을 가공하여 금속 안정화재로써 사용하였다.

Bi-2212 초전도체 외부에 Cu-Ni 튜브를 솔더링 기법을 적용하여 접착하였다. Cu-Ni 금속 안정화재와 세라믹 초전도체 간의 접합 능력을 향상시키기 위하여 초전도체 표면은 Ag 도금을 하였으

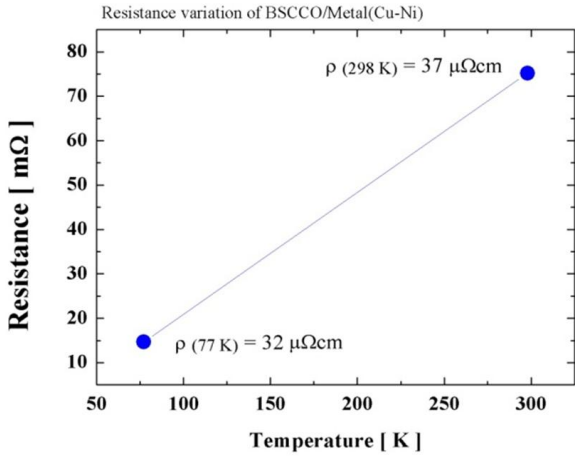


Fig. 3. Resistance variation of Cu-Ni shunt metal as a function of temperature.

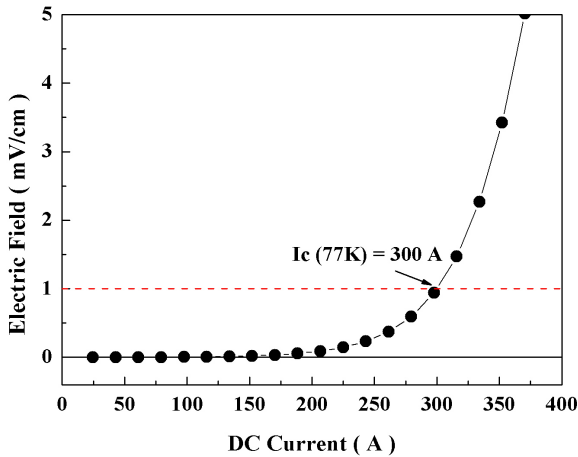


Fig. 4. Critical current of the Bi-2212 SFCL element.

며 Cu-Ni 안정화재와 Ag/Bi-2212 초전도체 간에 틈을 통하여 In 솔더를 침투시켜 솔더링하였다 [3]. 한류소자 양단에는 구리 전극을 역시 In 솔더를 이용하여 솔더링하여 부착하여 대전류 인가 시 상전도-초전도 접촉에 의해 발생하는 줄열의 영향을 최소화하도록 고려하였다. 다음 단계로서 한류소자 내부에는 FRP 튜브를 접착하고 외부 및 각 턴 사이의 틈새에는 에폭시를 사용하여 보강하여 기계적 강도를 강화하였다.

한편, 그림 1에 제시된 설계조건에 따라 코일형의 한류소자를 제작하기 위하여 Bi-2212/Cu-Ni

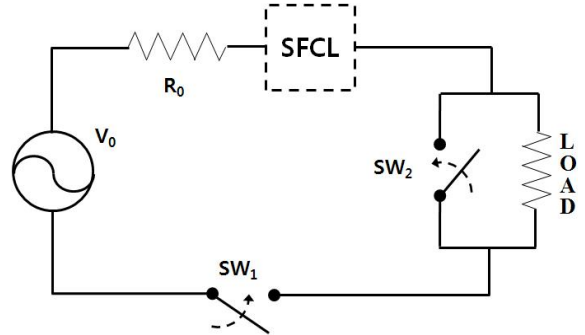


Fig. 5. Schematic diagram for fault current tests.

튜브를 3차원 기계 가공 공정을 거쳐 그림 2a 같은 monofilar 형태의 나선형 초전도 한류소자를 제작하였다. 한류기의 한류용량 및 정격전압 등을 고려하여 monofilar의 턴 수는 24, 통전 경로의 총 길이는 410 cm가 되도록 설계되었다. Cu/Ni 합금은 그림 3에 제시된 바와 같이 액체질소 기화 온도로부터 상온까지 32 ~ 37 μΩ-cm의 저항 분포를 보였다.

최종적으로 제작된 튜브 형태의 한류소자 표면에 FRP mesh를 감은 후 에폭시를 도포하여 경화 과정을 거쳐 그림 2b와 같이 BSCCO 소자 제작 공정을 마무리하였다.

제작된 한류소자의 가공 중 성능 저하 가능성을 확인하기 위하여 임계 전류를 측정하였으며, 그림 4와 같이 최종 제작된 한류소자로부터 300 A (@77 K, 1mV/cm criterion)의 임계전류를 보임을 확인하였다.

### III. 실험 결과

제작된 BSCCO 한류소자의 고장전류 인가시험을 위하여 그림 5와 같은 단락사고 시험회로를 구성하여 인가 전압을 10  $V_{rms}$  ~ 200  $V_{rms}$  까지 인가하고 한류 소자 양단에 걸린 전압과 한류 전류를 측정하여 성능을 시험하였다.

그림 6은 제작된 시편의 단락사고시험 결과를 나타내고 있다. 결과로부터 시편 양단에 200  $V_p$ 의 전압을 인가하였을 때 사고전류는 1/2 주기 경과 후 3 kAp 이하로 성공적으로 제한되었음을 알 수

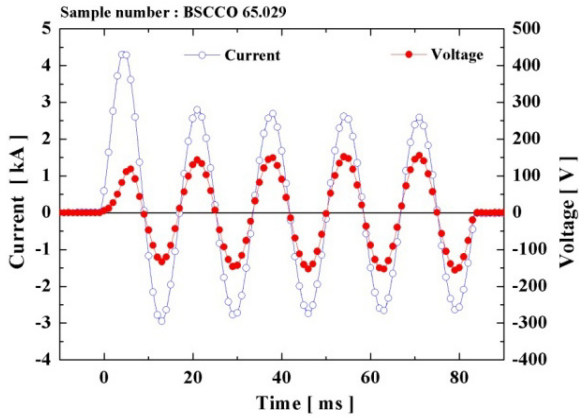


Fig. 6. Current limiting property of the Bi-2212 SFCL element.

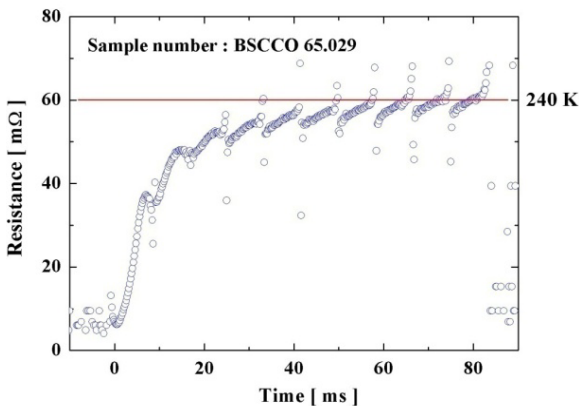


Fig. 7. Resistance increase during the current limiting operation of the Bi-2212 SFCL element.

있다. 그림 7에 나타난 바와 같이 한류 소자의 켄치에 의해 5주기 경과 후 한류소자의 저항은 60 mΩ 까지 증가하였다. 초전도성을 잃은 Bi-2212의 저항이 금속 선트의 저항보다 훨씬 커서 켄치 발생 후 거의 모든 사고 전류가 한류소자의 안정화재인 금속 선트를 통하여 흐른다고 가정하면 한류 중 줄열에 의해 증가하는 온도를 간접적으로 파악할 수 있다.

그림 3에 제시된 금속 선트의 저항 변화로부터 제작된 소자의 한류 동작 중 온도 증가를 유추하면 그림 7과 같이 240 K까지 증가하였음을 알 수 있다. 결과로부터 한류소자의 정격 전압을  $143 V_{rms}$  ( $E = 0.35 V_{rms}/cm$ )로 결정할 수 있다. 표 2에

Table 2. Power ratings of BSCCO/Cu-Ni SFCL.

정격 전류 $I_r$	$212 A_{rms}$
정격 전압 $V_{rms}$	$143 V_{rms}$ or higher
가용 전기장 $E$	$E = 0.35 V_{rms}/cm$
한류소자 용량	30 kVA at 77 K

제시된 바와 같이, 한류소자의 임계전류가 300 A 이므로 정격 전류는  $212 A_{rms}$ 로 얻을 수 있고 따라서 한류소자의 용량은 77 K 조건에서 30 kVA로 산정되어 한류소자 설계 목표치를 만족하는 결과를 얻었다.

### III. 결론

튜브 형태의 Bi-2212 한류소자를 제작하였으며 고장전류 인가시험을 거쳐 전류제한 성능을 시험하였다.

외경과 길이가 각각  $\varnothing 50 \text{ mm} * L 300 \text{ mm}$ 이고 두께는 4.5 mm인 초전도 튜브를 3차원 가공 공정을 통하여 턴 수 24, 총 통전 길이 410 cm의 나선형 monofilar 초전도 한류소자로 가공하였다. 또한 한류 동작 중 켄치 현상에 의해 발생하는 줄열을 분산시키고 인가전압의 고른 분포를 도모하기 위하여 슬터링 공정을 통하여 Cu-Ni 금속 안정화재를 초전도체와 결합하였다. 제작된 한류소자의 표면 및 턴 간 틈새는 FRP와 에폭시를 이용하여 충전하여 기계적 강도를 높였다. 고장전류 인가시험을 통하여 임계전류 300 A의 한류소자에  $143 V_{rms}$ 의 전압을 인가하였을 때, 소자의 온도가 240 K까지 증가하였고 결합 발생없이 전류를 제한할 수 있는 것을 확인하였다. 결과로부터 제작한 BSCCO 초전도 한류소자의 정격용량이 77 K 조건에서 30 kVA가 됨을 확인하였다.

### Acknowledgments

"This research was supported by a grant from Center for Applied Superconductivity Technology of

the 21st Century Frontier R&D Program funded by the Ministry of Education, Science and Technology, Republic of Korea"

## References

- [1] S.-W. Yim, H.-R. Kim, O. -B. Hyun, J. Sim, "Quench and recovery characteristic of Au/YBCO thin film type SFCL," *Physica C*, 463-465, 1172-1175 (2007).
- [2] S.Y. Oh, H.R. Kim, Y.H. Jeong, O. B. Hyun, C.J. Kim, "Joining of Bi-2212 high-Tc superconductors and metals using indium solders," *Physica C*, 463-465, 464-467 (2007).
- [3] 오성용, 임성우, 김혜림, 현옥배, 장건익, "12 KVA 급 BSCCO 한류소자 제작 및 특성 실험," 한국초전도저온공학회 논문지, 10권 1호, 24-27 (2008).