

# 배전급 초전도 한류기 개발을 위한 Bi-2212 초전도 한류소자의 사고전류 제한 특성

論 文

56-2-8

## Fault Current Limitation Characteristics of the Bi-2212 Bulk Coil for Distribution-class Superconducting Fault Current Limiters

沈政煜<sup>†</sup> · 李海根<sup>\*</sup> · 任星禹<sup>\*\*</sup> · 金惠林<sup>\*\*</sup> · 玄鉦培<sup>\*\*</sup> · 朴權培<sup>\*\*\*</sup> ·  
李昉昱<sup>\*\*\*</sup> · 吳一成<sup>\*\*\*</sup> · 金鎬民<sup>§</sup>

(Jungwook Sim · Haigun Lee · Sung-Woo Yim · Hye-Rim Kim · Ok-Bae Hyun ·  
Kwon Bae Park · Bang Wook Lee · Il-sung Oh · Ho Min Kim)

**Abstract** - We investigated fault current limitation characteristics of the resistive superconducting fault current limiter (SFCL) which consisted of a Bi-2212 bulk coil and a shunt coil. The Bi-2212 bulk coil and the shunt coil were connected in parallel. The Bi-2212 bulk coil was placed inside the shunt coil to induce field-assisted quench. The fault test was conducted at an input voltage of 200 V<sub>rms</sub> and fault current of 12 kA<sub>rms</sub> and 25 kA<sub>rms</sub>. The fault conditions were asymmetric and symmetric, and the fault period was 5 cycles. The test results show that the SFCL successfully limited the fault current of 12 kA<sub>rms</sub> and 25 kA<sub>rms</sub> to below 5.5 ~ 6.9 kA<sub>peak</sub> within 0.64 ~ 2.17 msec after the fault occurred. Limitation was faster under symmetric fault test condition due to the larger change rate of current. We concluded that the speed of fault current limitation was determined by the speed of current rise rather than the amplitude of a short circuit current. These results show that the Bi-2212 bulk coil is suitable for distribution-class SFCLs.

**Key Words** : superconducting fault current limiter, SFCL, Bi-2212 bulk coil, field-assisted quench, distribution-class

### 1. 서 론

최근 들어 다양한 종류의 초전도 전력기기 개발이 진행되고 있다. 특히 초전도 한류기의 경우는 빠른 시기에 실용화가 가능할 것으로 예측되고 있다. 전력기기에서 초전도체의 응용분야는 초전도체의 저항이 0인 점이나 마이스너 효과 등의 초전도 고유특성을 응용하는 것이 대부분이다. 하지만 초전도 한류기는 한류기 역할의 특성상 상시에는 전력계통에 없는 듯 존재하다가 사고 발생시 초전도 한류기의 상전어로 임피던스를 발생시켜 사고전류를 제한하는 역할을 한다. 특히 저항형 초전도 한류기의 경우 무게 및 부피가 작고 시스템이 비교적 간단하다[1]-[8].

초전도 한류기는 기존의 차단기와는 다른 개념의 동작특성을 가지고 있으며 아직까지는 실용화 되어있지 않기 때문에 특별한 기준이 정해져 있지 않다. 하지만 적용되는 계통에서 발생하는 최대 사고전류에 대해서도 충분히 신뢰할 수 있는 동작을 해야 한다. 따라서 현재 개발 중인 배전급 초전도 한류기의 경우 사고전류에 대한 내력 기준을 배전급 차단기의 사고전류 용량 기준에 준하게 정하는 것이 바람직하

다. 현재 배전급 차단기의 사고전류 용량기준은 계통의 상황에 따라 구분되지만 일반적으로 최대 25 kA<sub>rms</sub>를 기준으로 하고 있다. 따라서 초전도 한류기는 사고발생시 최대 사고전류가 유입되더라도 소자의 안정성을 확보하면서 사고전류를 제한할 수 있는 내력조건을 가져야 한다.

본 논문은 배전급 초전도 한류기 개발에 있어서 사용되는 Bi-2212 벌크코일(bulk coil)과 셉트 코일(shunt coil)을 이용한 초전도 한류소자의 사고전류 제한 특성에 관한 결과이다. Bi-2212 벌크 코일과 셉트 코일은 서로 병렬로 결선되어 있고, 셉트 코일은 사고 발생시 Bi-2212 벌크 코일에 인가되는 사고전류를 분담하고 자장을 발생시켜 Bi-2212 벌크 코일의 균등 켄치를 유도한다[9][10]. 사고전류는 배전급 차단기의 사고전류 용량에 준하는 12.5 kA<sub>rms</sub> 및 25 kA<sub>rms</sub>를 인가하였고 각 경우에 대한 사고전류 제한특성을 비교하였다.

### 2. 초전도 한류소자 및 단락 사고 모의 시험

#### 2.1 Bi-2212 벌크 코일과 셉트 코일

본 실험에서 사용된 초전도 한류소자는 독일의 Nexans SuperConductors GmbH에서 공급을 받은 Bi-2212 벌크 코일이다. 이 초전도체는 원심성형법으로 제작된 튜브형태의 초전도 벌크를 통전 전류 용량에 맞춰 코일 형태로 가공되어 있다. 가공된 벌크코일은 기계적 충격에 대비하여 내외측에 FRP와 에폭시 등으로 보강하였고 양 끝단에 전류 통전을 위한 구리단자가 부착되어 있다.

그림 1은 본 실험의 사고발생에 따른 초전도 한류소자의 켄치 개념도이다. 그림에서 나타난 바와 같이 Bi-2212 벌크

† 교신저자, 正會員 : 高麗大學 新素材工學部

E-mail : simwork@paran.com

\* 正會員 : 高麗大學 新素材工學部

\*\* 正會員 : 韓電 電力研究員

\*\*\* 正會員 : LS產電 電力研究所

§ 正會員 : 韓國電氣研究員

接受日字 : 2006年 9月 27日

最終完了 : 2006年 12月 5日

코일과 션트 코일은 서로 병렬로 결선되어 있으며 Bi-2212 벌크 코일은 션트 코일의 내부에 위치하게 된다. 그림 1 (a)에 나타난 바와 같이 사고가 발생하지 않는 정상시에는 전체 전류( $I_{tot}$ )는 저항이 0인 초전도상태의 Bi-2212 벌크 코일로 통전하게 된다. 만약 사고가 발생하여 매우 큰 전류가 유입될 경우 Bi-2212 벌크 코일은 초전도성을 잃게 되고  $J_c$ 가 낮은 부분부터 퀘치가 되어 국부적으로 저항이 발생하기 시작하게 된다. 이 경우 사고전류  $I_{tot}$ 는 Bi-2212 벌크 코일에서 발생한 국부적인 저항으로 인하여 그림 1 (b)에 나타난 바와 같이 Bi-2212 벌크 코일 ( $I_{hts}$ )에서 션트 코일 ( $I_{coil}$ )로 많은 양의 사고전류가 우회하게 된다. 이때 션트 코일에는  $I_{coil}$ 에 의해 자장( $B_{coil}$ )이 발생하게 된다. 여기서 발생하는 자장  $B_{coil}$ 는 션트 코일 내부의 Bi-2212 벌크 코일에 인가되고, 인가된 자장으로 인하여 초전도체의 전 영역에 걸쳐서  $J_c$ 가 급격하게 감소하게 된다. 이에 따라 최초  $J_c$ 가 낮은 지역에서 발생되었던 퀘치가 가속되어 초전도체의 전 영역에 걸쳐 균등하게 퀘치를 발생시킴으로 국부적인 퀘치로 인한 소자의 불안정성을 해소시킬 수 있다[9][10].

그림 2 (a)는 실험에 사용된 션트코일이고 (b)는 Bi-2212 벌크 코일이다. 벌크코일의 턴 수는 10.5턴으로 임계전류  $I_c$ 는 300 A가 된다. Bi-2212 벌크 코일은 외경 25 mm, 두께 1.6 mm, 길이 170 mm이고 구리단자를 포함한 총길이는 210 mm로 제작되었다. 션트 코일사양은  $R_{coil} = 70 \text{ m}\Omega$ 이고  $X_{coil} = 25 \text{ m}\Omega$ 이다. 표 1은 실험에 사용된 Bi-2212 벌크 코일의 사양이다. 최종적으로는 앞에서 언급한 바와 같이 그림 2 (c)에 나타난 형태로 션트 코일 내부에 Bi-2212 벌크 코일이 위치하게 되고 서로 병렬로 결선하여 하나의 초전도 한류소자로 구성하게 된다.

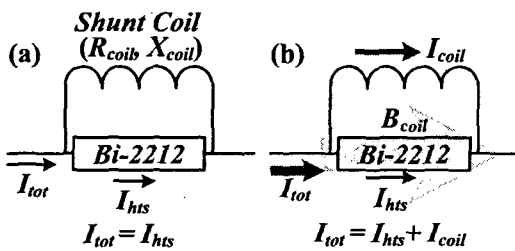


그림 1 Bi-2212 벌크코일과 션트코일을 이용한 초전도 한류소자의 퀘치

(a) 퀘치 발생 전 (b) 퀘치 발생 후

Fig. 1 The quench mechanism of the SFCL using Bi-2212 bulk coil and shunt coil.

(a) Before the quench generation

(b) After the quench generation

표 1 Bi-2212 벌크코일의 사양

Table 1 Specification of the Bi-2212 bulk coil

길이	210 mm	외경	25 mm
턴 수	10.5 turns	단면적	14.5×1.6 mm
임계전류( $I_c$ )	300 A	상온저항	1.1 $\Omega$

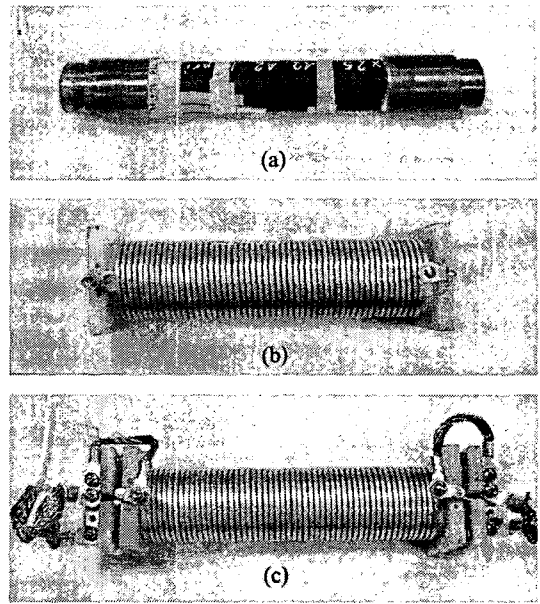


그림 2 (a) 션트 코일, (b) Bi-2212 벌크코일, (c) 조립된 초전도 한류소자

Fig. 2 (a) A shunt coil, (b) a Bi-2212 bulk coil, (c) an assembled SFCL module

## 2.2 단락 사고 모의 시험

단락 사고 모의 시험은 공동연구기관인 LS 산전 전력기술시험센터에서 진행하였다. 그림 3 (a)에서 나타난 바와 같이 사고전류의 크기는  $CLR$ 를 통하여 조절되고 두 개의 on/off 스위치를 통하여 단락사고가 통제된다. 실제 실험에 앞서서 정확한 입력전압 및 사고전류를 조정하기 위해 초전도 한류소자가 회로에 없는 상태에서 사고전류를 투입하여 교정작업을 수행하였고, 이후 초전도 한류소자를 회로에 투입하여 소자 양단전압( $V_{tot}$ )과 전류( $I_{tot}$ )를 측정하였다. 초전도 한류소자는 극저온 용기 내부에 설치하였고  $LN_2$ 를 주입하여 초전도상태로 유지하였다.

초전도 한류소자의 시험전압은 200 V<sub>rms</sub>, 사고주기는 5 주기이다. 사고전류의 크기는 일반적인 배전급 차단기의 차단용량기준에 준하는 12.5 kA<sub>rms</sub> 및 25 kA<sub>rms</sub>로 정하였다. 또한 각 사고 전류에 대해 사고 투입 시점 및 계통의 상황을 고려하여 대칭사고와 비대칭 사고로 구분하여 수행하였다. 대칭사고와 비대칭사고는 동일한 사고전류에 대하여 전류가 0인 점을 기준으로 파형이 대칭인 경우와 비대칭인 경우로 구분한다. 이 사고사고 발생시 단락사고 회로는 대부분  $R \ll \omega L$ 의 관계이므로 사고전류  $I_{tot}$ 는 아래의 식 (1)처럼 정리할 수 있다.

$$I_{tot}(t) = I \cdot \sin(\omega t + a) - I \cdot \sin a \cdot e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1)$$

여기서  $I = V_s / Z$  ( $Z$ =초전도 한류소자가 없을 때 사고 회로임피던스),  $a$  = 전압 위상각,  $R, L$  = 단락 회로의 저항 및 인덕턴스이다. 여기서 대칭사고의 경우는  $a = 0^\circ$  또는  $180^\circ$ , 즉 사고발생시점  $t=0$ 인 순간에 교류전압 순시치가 최대가 되는 위상으로 단락되었을 때 직류분비가 가장 작고,  $a = 90^\circ$  또는  $270^\circ$ , 즉 교류전압 순시치가 영이 되는 위상에서 단락했을

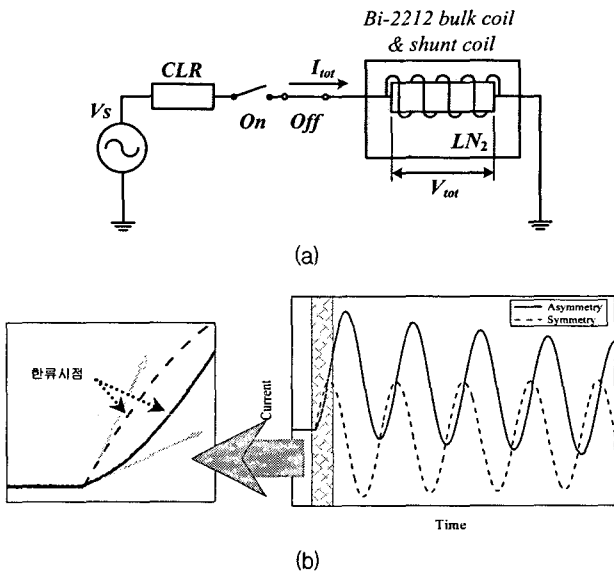


그림 3 (a) 초전도 한류소자의 단락시험회로  
 (b) 비대칭사고 및 대칭사고 전류 비교  
 Fig. 3 (a) A schematic diagram of the short circuit test circuit  
 (b) Comparison of the asymmetry and symmetry fault currents

경우에 직류분은 가장 커진다. 따라서 그림 3(b)에서와 같이 비대칭사고는 직류분이 더해져 사고 발생 후 전류의 첫 피크 값이 큰 특징이 있다. 이러한 직류 성분은 시간이 지남에 따라 수 주기 후 감소된다. 이와 달리 대칭사고의 경우는 직류 성분이 추가되지 않으므로 사고 발생 후 첫 피크 전류가 비대칭의 경우보다 작다. 하지만 그림 3(b)에서 나타난 바와 같이 사고 발생 직후의 파형을 확대한 그림을 보면 대칭사고의 경우가 비대칭사고보다 초전도 한류소자의 한류시점에 먼저 다다르게 된다.

이것은 초전도 한류소자가 초기 피크전류가 큰 비대칭사고보다 대칭사고에서 더 빠른 속도로 초전도체에서 상전도체로 상전이 되는 것으로, 고속 상전이로 인한 초전도 한류소자의 내력을 평가하는데 있어서 중요한 요소라고 할 수 있다.

### 2.3 단락시험 결과

그림 4는 초전도 한류소자가 없는 상태에서 입력전압 200 V<sub>rms</sub>, 사고전류 25 kA<sub>rms</sub>, 비대칭 조건일 경우의 교정파형(실선)과 동일한 사고에 대하여 그림 3(a)회로에 대한 초전도 한류소자의 양단전압 V<sub>tot</sub> (□)와 초전도 한류소자에 의해 한류가 되는 사고전류 I<sub>tot</sub> (○)이다. 그림의 교정파형에서 나타나듯이 초전도 한류소자가 없을 경우, 비대칭 사고의 초기 상승전류 피크값은 직류성분이 추가되어 52 kA<sub>peak</sub>로 25 kA<sub>rms</sub> 단락 전류 실효값의 약 2 배임을 알 수 있다. 이후 초전도한류소자를 투입한 결과에 따른 V<sub>tot</sub>와 I<sub>tot</sub>를 보면 초전도 한류소자의 양단전압은 280 V<sub>peak</sub>이고 사고전류는 3.2 kA<sub>peak</sub>수준으로 사고전류가 한류가 되었음을 알 수 있다. 그림 좌측 상단의 사고 직후 사고전류의 변화를 보면 t=0에서 발생한 사고전류는 교정파형과 동일하게 진행하다가 6 kA<sub>peak</sub>까지 상승한후 전류가 제한되었다. 또한 비대칭에 의

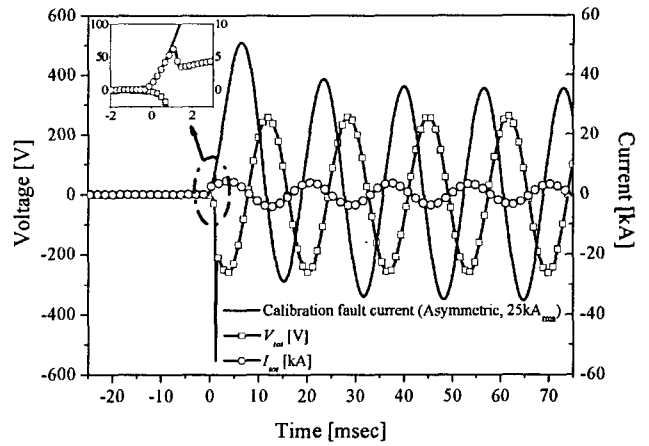


그림 4 비대칭사고전류(25 kA<sub>rms</sub>)와 초전도 한류소자 양단 전압 및 전류  
 Fig. 4 The calibrated fault current (asymmetry, 25 kA<sub>rms</sub>) and V<sub>tot</sub> & I<sub>tot</sub>

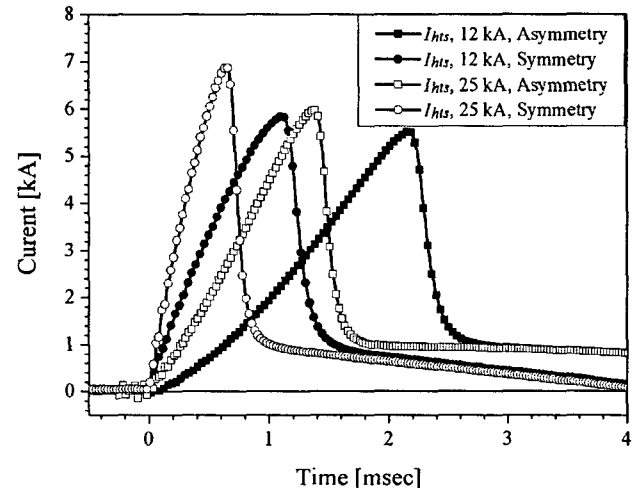


그림 5 각 사고조건에 따른 초기 상승 전류  
 Fig. 5 The 1st half cycle current with various fault conduction

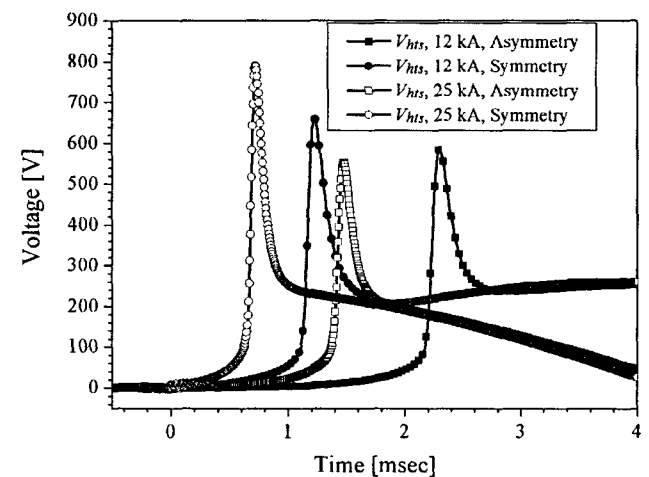


그림 6 각 사고조건에 따른 초기 상승 전압  
 Fig. 6 The 1st half cycle voltage with various fault conduction

한 DC 성분이 급격히 감소되는데 이것은 초전도 한류소자에서 발생된 저항성분에 의해 시정수가 감소되기 때문이다. 전체적으로 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>의 비대칭 및 대칭사고 조건에 대한 초전도 한류소자의  $V_{tot}$ 와  $I_{tot}$ 에 대한 결과는 사고 발생 직후의 초기 상승분을 제외하고 나머지 주기에 대하여 그림 4의 결과와 동일하게 나타났다.

그림 5와 그림 6은 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>의 비대칭, 대칭 사고일 경우에 대한 초기 상승전류( $I_{hs}$ ) 및 초전도 한류소자의 양단 전압( $V_{hs}$ )이다. 그림 5에서 각 사고조건에 대한 사고전류의 제한속도를 보면 대칭사고가 비대칭사고의 경우보다 더 빠른 것을 알 수 있다. 특히 25 kA<sub>rms</sub>의 경우 비대칭사고의 경우 1.37 msec만에 6 kA<sub>peak</sub>에서 한류가 되지만 대칭사고의 경우는 0.65 msec, 6.9 kA<sub>peak</sub>에서 한류가 되었다. 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 비대칭사고는 DC 성분이 포함되어 초기 상승전류가 크지만 대칭사고에 비하여 초기 상승속도는 느리다. 사고가 발생하게 되면 초전도 한류소자에는 임계전류( $I_c$ )보다 높은 전류가 유입되면서 그 즉시 저항이 발생하기 시작한다. 이로 인하여 초전도체에는 Joule heating이 발생하여 초전도체의 온도가 임계온도( $T_c$ )를 넘게 되고 상전도로 전이하게 된다. 따라서 초전도 한류소자는 초전도체의 임계특성의 조건에 따라 사고전류의 절대적인 크기보다는 초기에 인입되는 사고전류의 상승속도( $di/dt$ )에 따라서 초전도 한류기의 초기 한류속도가 결정됨을 알 수 있다. 또한 그림 6의 초기 전압특성에서도 나타난 바와 같이 대칭사고의 경우가 비대칭 사고에 비해 빠른 전압상승시간을 나타내고 있다. 표 2는 각 사고전류에 대한 초기 상승전류의 피크값과 이때의 시간이다.

그림 7은 각 사고조건에 따른 Bi-2212 벌크 코일의 저항 변화이다. 벌크 코일의 저항변화는 초전도 한류소자의 양단 전압과 초전도 벌크코일에 흐르는 전류를 이용하여 계산하였다. 그림에서 나타난 바와 같이 사고발생 후 5 주기 이후에 해당하는 80 msec에서의 Bi-2212 벌크 코일의 저항을 보면 0.8~0.85 Ω에 걸쳐서 분포하고 있다. 이 저항값을 Bi-2212 벌크 코일의 저항에 따른 온도값으로 환산하면 224~230 K으로 전체적으로 250 K이하의 온도분포를 가짐으로 매우 안정적이라고 볼 수 있다. 따라서 실험에 사용된 초전도 한류소자는 배전 용량의 사고전류에 대하여 안정적인 동작하고 있다.

표 2 사고 발생시 초전도한류기의 동작에 따른 초기 상승전류 및 시간

Table 2 1st peak currents and cut-off times of SFCL elements with the fault condition

	초기상승전류 [kA <sub>peak</sub> ]	시간 [msec]
12.5 kA <sub>rms</sub> , 비대칭	5.5	2.17
12.5 kA <sub>rms</sub> , 대칭	5.8	1.1
25 kA <sub>rms</sub> , 비대칭	6	1.37
25 kA <sub>rms</sub> , 대칭	6.9	0.64

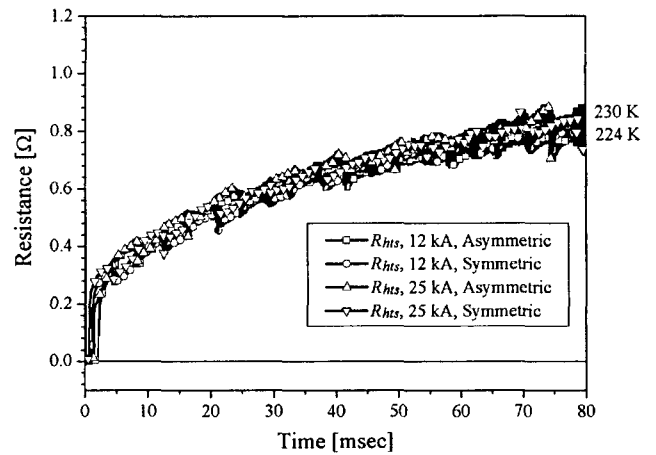


그림 7 각 사고조건에 따른 Bi-2212 벌크코일의 온도변화  
Fig. 7 Temperature variation of the Bi-2212 bulk coil with the fault conduction

### 3. 결론

이상과 같이 Bi-2212 벌크 코일과 셉트 코일이 병렬로 결선된 초전도 한류소자를 이용하여 배전급 단락사고인 12.5 kA<sub>rms</sub>와 25 kA<sub>rms</sub>에 대한 단락사고시험을 하였다. 실험결과 초전도 한류소자는 배전급 차단기의 차단 용량에 준하는 사고전류에 대하여 우수한 한류특성을 나타내었다. 전반적으로 한류시점은  $di/dt$ 가 큰 대칭사고에서 빨리 나타났으며, 사고전류의 크기보다는 전류상승 속도에 따라 한류속도가 결정됨을 알았다. 또한 각 사고에 대하여 초전도 한류소자에서 발생하는 온도는 224~230 K 미만으로 배전급 용량의 사고전류가 유입되더라도 충분히 안정적으로 동작할 수 있음 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies, W.-W. Neumueller, E. Baltzer, S. Fischer, and B. Heismann, "Resistive fault current limiters with YBCO films 100 kVA functional model," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 656-659, June 1999.
- [2] M. Chen, et al., "6.4 MVA resistive fault current limiter based on Bi2212 superconductor," Physica C, vol. 372, pp. 1657-1663, 2002.
- [3] H. Kramers, W. Schmidt, B. Utz, and H. Neumueller, "Switching Behavior of YBCO Thin Films Conductors in Resistive Fault Current Limiter," IEEE

Trans. on Appl. Supercond., vol.13, no. 2, pp. 2044-2047, June 2003.

- [4] K. Tekletsadik, M. P. Saravolac, and A. Rowley, "Development of a 7.5 MVA superconducting fault current limiter," IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 9, no. 2, pp. 672-675, June 1999
- [5] K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Nakamura, and Y. Ozawa, "Desigh of a large current-type fault current limiterwith YBCO films," Physica C, vol. 372, pp. 1643 1648, 2002.
- [6] W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, D. Braun, and W. Lanz, "Fault current limiter based on high temperature superconductors different concepts, test results, simulations, applications," Physica C, vol. 354, pp. 27 33, 2001.
- [7] J. Bock et al., "Development and successful testing of MCP BSCCO -2212 components for a 10 MVA resistive superconducting fault current limiter," Supercond. Sci. Technol., vol. 17, pp. 122-126, 2004.
- [8] Ok-Bae Hyun et al, "6.6 kV Resistive Superconducting Fault Current Limiter Based on YBCO Films," IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 15, No. 2, pp.2027-2030, 2005
- [9] S. Elschner, F. Breuer, H. Walter and J. Bock, "Magnetic Field Assisted Quench Propagation as a New Concept for Resistive Current Limiting Devices," Journal of Physics: Conference Series 43, pp.917-920, 2006
- [10] 심정욱 외 4 명, "shunt coil에 따른 Bi-2212 monofilar coil의 켄치 특성", 2005 초전도저온공학회 학술대회 논문집, pp.131-134, 2005

저 자 소 개



**심정욱 (沈政煜)**

1970년 10월 10일생. 1996년 순천향대 공대 전기공학과 졸업, 1998년 동대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2003년 동대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 공학기술연구소 연구원



**이해근 (李海根)**

1987년 고려대학교 공대 재료공학과 졸업, 1990년 University of Illinois, Materials and Metallurgy 졸업(석사), 1995년 동대학원 Materials Science and Engineering 졸업(공학박사), 현재 고려대학교 신소재공학부 부교수



**임성우 (任星禹)**

1973년 2월 28일생, 1997년 전북대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동대학교 전기공학과 (석사), 2004년 동대학교 전기공학과 졸업 (공학박사), 현재 한전 전력연구원 연구원



**김혜림 (金惠林)**

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 책임연구원



**현옥배 (玄鈺培)**

1953년 2월 11일생. 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 Iowa State Univ. 대학원 물리학과 졸업(이학박사), Ames Lab., NIST, ISTEK 연구원 역임, 현재 한전 전력연구원 수석연구원



**박권배 (朴權培)**

1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사), 현재 LS산전 전력연구소 선임연구원



**이방욱 (李昉昱)**

1968년 6월 20일생, 1991년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 LS산전 전력연구소 책임연구원



**오일성 (吳一成)**

1960년 12월 22일생, 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업, 1990년 미시간주립대학원 재료공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 LS산전 전력연구소 수석연구원



**김호민 (金鎬民)**

1970년 8월 23일생, 1995년 제주대학교 전기공학과 졸업, 1998년 연세대학교 전기·컴퓨터공학과 졸업(석사)동대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학박사), 현재 전기연구원 초전도응용그룹 선임연구원