

## 190 kVA급 초전도한류소자의 특성

### Characteristics of a 190 kVA Superconducting Fault current Limiting Element

마용호<sup>1</sup>, 이주영<sup>1</sup>, 류경우<sup>2,\*</sup>, 박권배<sup>3</sup>, 오일성<sup>3</sup>

Y. H. Ma<sup>1</sup>, Z. Y. Li<sup>1</sup>, K. Y. Ryu<sup>2,\*</sup>, K. B. Park<sup>3</sup>, I. S. Oh<sup>3</sup>

**Abstract:** We are developing a 22.9 kV/25 MVA superconducting fault current limiting (SFCL) system for a power distribution network. A Bi-2212 bulk SFCL element, which has the merits of large current capacity and high allowable electric field during fault of the power network, was selected as a candidate for our SFCL system. In this work, we experimentally investigated important characteristics of the 190 kVA Bi-2212 SFCL element in its application to the power grid, e.g. DC voltage-current characteristic, AC loss, current limiting characteristic during fault, and so on. Some experimental data related to thermal and electromagnetic behaviors were also compared with the calculated ones based on numerical method. The results show that the total AC loss at rated current of the 22.9 kV/25 MVA SFCL system, consisting of one hundred thirty five 190 kVA SFCL elements, becomes likely 763 W, which is excessively large for commercialization. Numerically calculated temperature of the SFCL element in some sections is in good agreement with the measured one during fault. Local temperature distribution in the 190 kVA SFCL element is greatly influenced by non-uniform critical current along the Bi-2212 bulk SFCL element, even if its non-uniformity becomes a few percentages.

**Key Words:** AC loss, Bi-2212 bulk, fault current limiting characteristic, local temperature distribution, super-conducting fault current limiting element.

중인 22.9 kV/25 MVA급 고온초전도한류기 시스템을 위한 소자로서 Bi-2212 bulk재료로 된 초전도한류소자가 가장 유력시되어 왔다.

따라서 본 논문에서는 대용량 Bi-2212 초전도한류소자의 전력계통 응용에서 중요한 정상(초전도상태)운전 시 및 사고(퀵치)시 주요한 특성인 DC 전압 - 전류특성, 교류손실특성, 사고전류 제한특성 및 온도분포 등에 대해 실험적·이론적으로 검토를 하였다.

## 2. 실험 샘플

Table 1에는 22.9 kV/25 MVA급 초전도한류기용 고온초전도한류소자의 주요 사양을 나타내었으며, Table 1과 같은 Bi-2212 bulk재료는 서론에서처럼 대전류 용량화가 용이할 뿐만 아니라 전력계통 사고 시 즉 퀵치 시 허용전계 가 큰 장점을 지닌 반면, 현재 재료기술 수준을 고려할 때 재료의 불균일한 특성으로 인하여 전력계통 사고 시 지나친 국부적 발열로 말미암은 정격용량이하에서 단선 문제, 또는 정격전류보다 대단히 큰 사고전류에 의해 발생하는 과도한 자기력에 의한 기계적 파손 등의 문제점을 지니고 있다. 특히 후자와 같은 세라믹 재료의 본질적인 기계적 취약성을 보완하기 위해서는 간단한 구조물(FRP파이프)로 보강을 하기도 한다.

Fig. 1에는 Table 1의 Bi-2212 monofilar의 외관사진 및 monofilar의 내·외부에 FRP파이프로 보강을 한 최종형상의 초전도한류소자에 대한 단면 사진을 각각 나타내었다.

Table 1. Specification of a 190 kVA Bi-2212 superconducting fault current limiting element.

|                        |                |
|------------------------|----------------|
| 정격전압                   | 300 Vrms       |
| 정격전류                   | 630 Arms       |
| Bi-2212 monofilar의 총길이 | 1050 mm        |
| Bi-2212 monofilar의 턴수  | 12 턴           |
| Bi-2212 1턴의 두께/높이      | 1.6 mm/10 mm   |
| 내부FRP 내반경/높이           | 8.9 mm/131 mm  |
| 외부FRP 내반경/높이           | 13.5 mm/131 mm |
| 내·외부FRP 두께             | 2 mm           |
| 에폭시 두께                 | 1 mm           |

## 1. 서 론

최근 Bi-2212 bulk재료 기술의 발전에 힘입어 대전류용량화가 용이할 뿐만 아니라 전력계통 사고시 허용전계(Bi-2212튜브의 경우 ~6 Vrms/cm) 가 큰 장점을 지니고 있어 [1], 배전급의 고온초전도한류기 시스템에 대한 실증시험 단계에 이르렀다. 이의 일환으로 현재 개발

<sup>1</sup>학생회원 : 전남대학교 전기공학과

<sup>2</sup>정 회 원 : 전남대학교 전기공학과

<sup>3</sup>정 회 원 : LS 산전 전력연구소

\*교신저자 : kwryul@hanmail.net

원고접수 : 2007년 2월 12일

심사완료 : 2007년 3월 16일

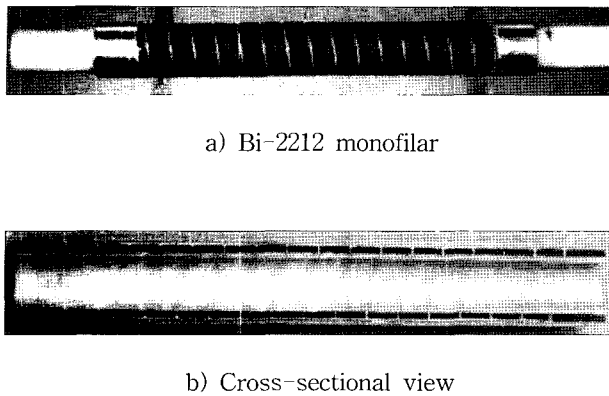


Fig. 1. Photos of the 190 kVA Bi-2212 superconducting fault current limiting element.

### 3. 수치해석모델링

Fig. 1의 Bi-2212 monofilar에 대하여 앞서 (2. 실험 샘플) 언급한 바와 같이 전력계통 사고 시, bulk재료의 불균일한 특성에 의한 국부적 온도상승 및 정상운전시, 한류기의 임피던스에 대한 이론적 이해를 위하여 본 연구에서는 상용S/W를 활용한 수치해석방법을 사용하였다. 먼저 해석을 위한 기하학적인 모델링은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 Bi-2212 monofilar가 원통형코일임을 고려하여 축대칭의 2차원(2D)형상으로 하였고, 나머지 구조물(FRP 및 에폭시)의 사이즈는 Table 1의 데이터를 사용하였다.

또한 Bi-2212 bulk재료의 불균일 특성을 실험적으로 조사하기 위해 monofilar 양단뿐만 아니라 총 12턴의 코일을 2턴씩 6구간(section)으로 나누어 각각의 구간에 전압탭을 부착하였으며, 이의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

전력계통 사고 시, 초전도한류소자는 대단히 큰 사고전류에 의해 상전도로 급격히 전이된 결과, Bi-2212 monofilar에는 커다란 열이 발생하여 주변의 구조물인 FRP 및 에폭시로 확산되어 냉매로 전달되며, 이는 다음과 같은 편미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (1)$$

여기서  $\rho$ ,  $C_p$  및  $k$ 는 고체재료의 밀도, 비열 및 열전도도를,  $T$ 는 고체의 온도를, 그리고  $Q$ 는 단위체적당 발열과위를 각각 나타낸다.

또한 정상운전 시, 한류기의 임피던스는 맥스웰방정식 및 그 보조방정식으로부터 구해 질 수 있으며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}, \quad \vec{E} = \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간의 투자율을,  $\vec{A}$ ,  $\vec{J}$  및  $\vec{E}$ 는 벡터 자위, 전류밀도 및 자속밀도를 각각 나타낸다.

### 4. 실험 결과 및 고찰

#### 4.1. 정상운전시 특성

먼저 Bi-2212 monofilar의 불균일한 특성 조사를 위하여 Fig. 2에서와 같은 각각의 구간에 부착된 전압탭을 이용하여 77 K에서 측정한 각 구간의 임계전류 분포를 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 보는 바와 같이 각 구간 임계전류의 평균값 (233 A)을 기준 할 때, 임계전류의 편차가 가장 큰 구간은 1구간과 6구간으로 평균값으로부터 각각  $\pm 5\%$  정도로 재료특성은 비교적 균일한 것을 볼 수 있다.

또한 전력계통 사고 시, 사고 직후의 전류제한성능을 좌우하는 고온초전도체의 상전도로의 전이특성에 영향을 미칠. 뿐만 아니라 교류손실특성에도 주요한 DC 전압-전류특성을 조사하여 Fig. 3에 나타내었으며, 일반적으로 고온초전도체의 측정된 DC 전압-전류특성은 다음과 같은 식으로 잘 기술되는 것으로 알려져 있다[2].

$$\frac{E}{E_c} = \gamma \left( \frac{J}{J_c} \right)^n \quad (3)$$

여기서  $E$  및  $E_c$ 는 고온초전도체의 전기 및 임계전기 ( $10^{-4}$  V/m)를,  $J$  및  $J_c$ 는 전류밀도 및 임계전류밀도를,  $\gamma$  및  $n$ 은 각각 계수 및 n-value를 나타낸다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 Bi-2212 초전도한류소자의 n-value는 온도에 무관하게  $\sim 10$  정도로 유사하며, 최근 임계전류밀도가 큰 Bi-2223테이프 ( $\sim 20$ )와 비교해 매우 작은 것을 볼 수 있다[2]. 이는 특히 전력계통 사고 직후 사고전류제한 특성이 좋지 못함을 의미한다. 22.9 kV/ 25 MVA급 초전도한류기의 냉동기용량

Table 2. Critical current of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element in each section at 77K.

| Section No. | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 임계전류(A)     | 244 | 237 | 231 | 233 | 230 | 222 |

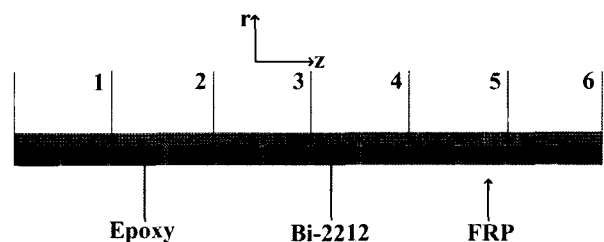


Fig. 2. Numerical modeling of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element.

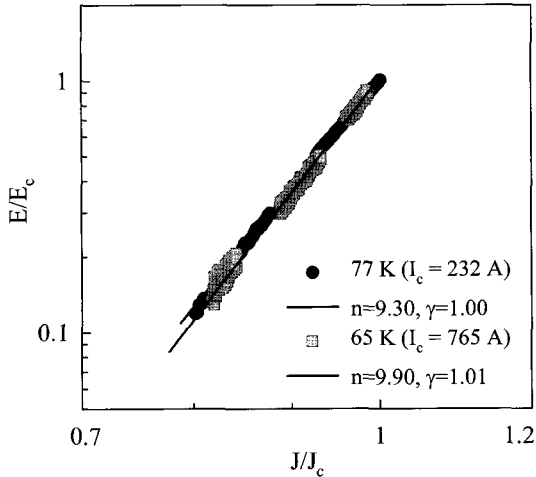


Fig. 3. DC voltage-current characteristic of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element.

결정에서뿐만 아니라 극저온 냉동기의 성능대비 가격이 매우 비싼 단점으로 인한 초전도한류기의 경제성 측면에서도 중요한 교류손실을 조사하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 손실을 측정하기 위해서 코일형상에서 손실자속을 충분히 쇄교토록 고안된 Diagonal 전압리드를 사용하였으며[3], 임계전류 ( $I_c$ )는 monofilar 양단에 부착된 전압리드로부터 측정된 값이며, 특히 77 K에서 monofilar 양단으로부터 측정된 임계전류 (232 A)는 Table 2의 각 구간에서 임계전류를 평균한 값 (233 A)과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4 a)에서 보는 바와 같이 측정된 교류손실은 전류의 주파수에 관계없이 동일하며, 이는 측정된 손실의 신뢰성이 양호함을 의미한다. 또한 Fig. 4 b)로부터 온도가 77 K에서 65 K로 감소함에 따라 임계전류는 ~3.3배정도 커지지만 통전전류에 대한 교류손실의 증가경향 (기울기)은 온도에 무관하게 거의 동일함을 볼 수 있다.

특히 본 연구에서 개발하고자 하는 22.9 kV/25 MVA급 초전도한류기를 Table 1의 정격전류(630 Arms로 Fig. 4 b)에서 수직한 점선)에서 운전할 경우, Bi-2212 초전도한류소자 1개당 ~5.65 W의 교류손실이 발생됨을 알 수 있다. 따라서 22.9 kV/25 MVA급 초전도한류기 제작에 소요될 것으로 예상되는 135개 (45개/상)의 초전도한류소자를 고려하면 65 K에서 시스템의 총 교류손실은 ~763 W로 대단히 큰 것을 알 수 있다.

마지막으로 초전도한류기의 정상운전 시, 기존 전력계통에 영향을 주지 않기 위해서는 가능한 한 한류기의 임피던스 즉 인덕턴스는 선로의 인덕턴스에 비해 가능한 한 작도록 해야 한다. 이를 위해 식(2)의 수치해석으로부터 얻어지는 자장 및 다음의 식(4)로부터 Bi-2212 초전도한류소자에 대한 인덕턴스를 계산한 결과 0.53μH(측정치는 0.56μH)로, 1상당 총 인덕턴스는 ~24 μH (45개의 한류소자를 직렬접속)로 비교적 작은 것을 알 수 있다.

$$W = \frac{1}{2} \int_v \vec{E} \cdot \vec{H} d_v = \frac{1}{2} LI^2 \quad (4)$$

여기서  $W$ 는 자계에너지를,  $\vec{E}$  및  $\vec{H}$ 는 자속밀도 및 자장세기,  $L$  및  $I$ 는 인덕턴스 및 전류를 각각 나타낸다.

#### 4.2. 사고시 특성

한류기로서 갖추어야 할 그 무엇보다도 중요한 성능은 전력계통의 단락 사고 시 발생하는 대단히 큰 사고전류를 신속히 작은 전류레벨로 억제시키는 기능이라 할 수 있다. 전력계통의 단락사고 발생 즉시 초전도한류소자에는 Table 1의 정격전압이 양단에 걸리게 되고, 동시에 임계전류보다 매우 큰 사고전류에 의한 급격한 저항성장으로 사고전류가 제한되는 원리이다.

Fig. 5에는 정격전압의 약 50%인 전압(~200 Vpeak)을 3주기(사고 시 차단기 동작시간이 3~5주기 이내임을 고려)동안 Bi-2212 초전도한류소자 양단에 인가할 때, 측정된 한류특성을 a)에, 그리고 각 구간에서 발생하는 발열파워를 b)에 각각 나타내었다. 특히 Fig. 5 b)에서 p1, p2, p3, p4, p5 및 p6는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 분할된 각 구간에서 발생하는 발열 파워를 나타낸다.

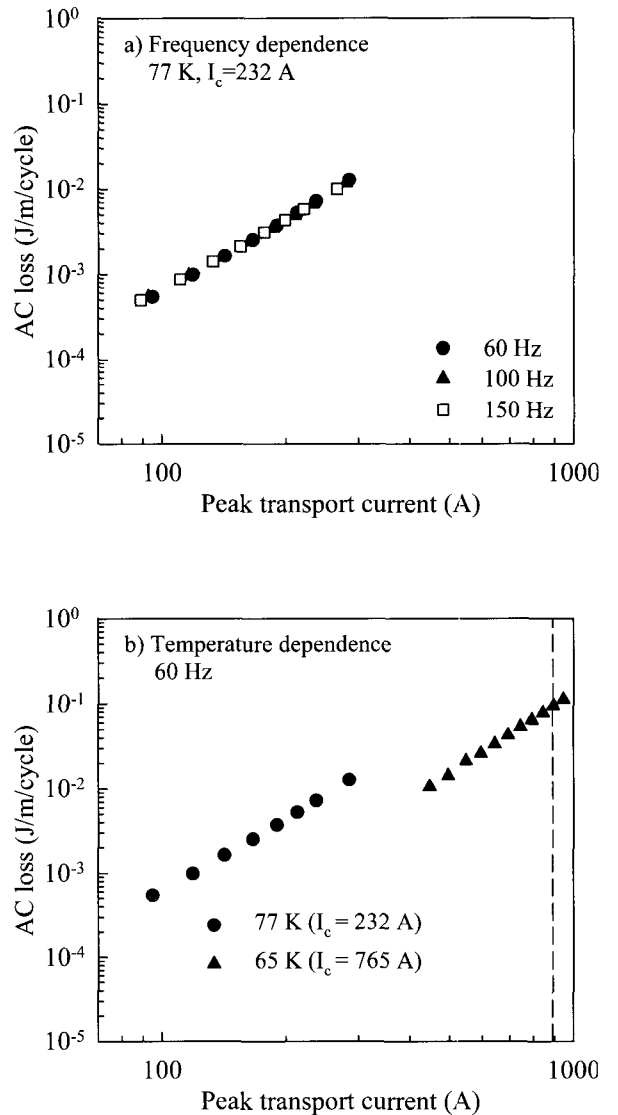


Fig. 4. AC loss characteristics of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element.

Fig. 5 a)에서 보는 바와 같이 단락사고 발생 직후 즉 소자양단에 전압이 인가된 직후, 정격전류의 ~3.5 배나 큰 전류 (~3 kApeak)까지 급격히 상승하지만 대단히 짧은 1/4주기(~4 ms)이내에 피크 사고전류의 1/10 (~0.3 kApeak)로 급격히 제한되는 응답특성이 매우 빠른 한류특성을 지니고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5 b)에서 보는 바와 같이 각 구간의 발열파위는 6구간 (p6)을 제외하고는 모든 구간이 비교적 균일한 발열분포임을 볼 수 있다. 이는 Table 2에서처럼 특히 6구간의 임계전류가 다른 구간보다 ~5 %정도 작기 때문으로 추정된다. 여기서 특히 각 구간의 임계전류가 수% (~5 %)정도 불균일함에도 불구하고 발열파위는 수십% (~30 %)정도 불균일하게 됨에 주의가 필요하다.

Fig. 5 b)의 각 구간별 발열파위 중에서 특히 발열이 큰 6구간과 발열파위가 비교적 유사한 나머지 다섯 구간 중에서 선정한 5구간에 대하여 식(1)로부터 계산한 온도 및 측정된 온도를 각각 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6 a)는 Fig. 5 b)에서 차단기에 의해 사고가 종료되어 더 이상 발열이 없어지는 시각인 120 ms 즉 온도상승이 최대로 되는 순간에서 반경방향 (r방향,

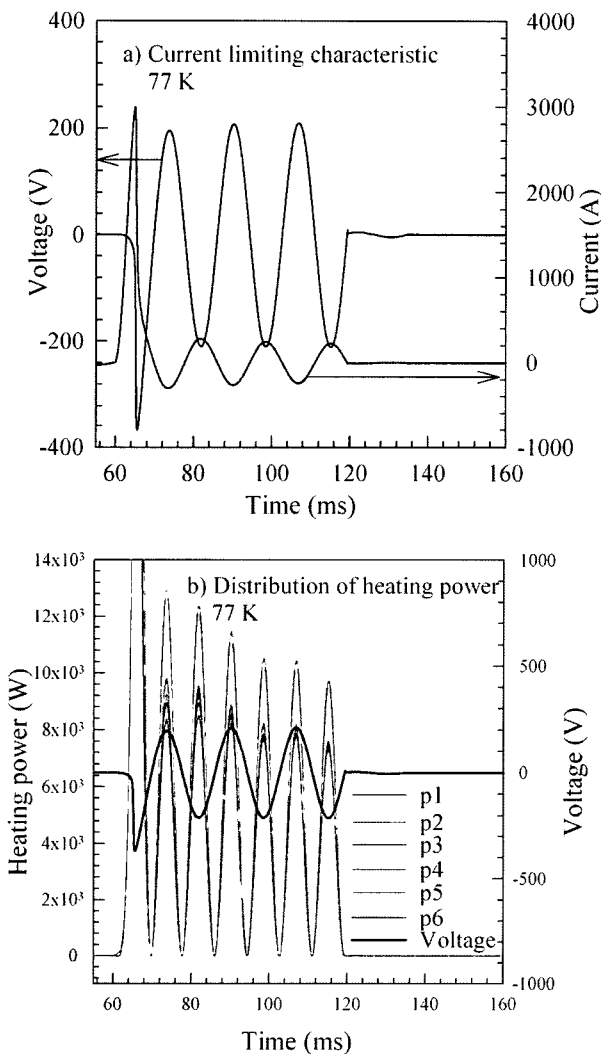


Fig. 5. Characteristics of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element during fault.

Fig. 2 참조) 좌표에 대한 5구간 및 6구간의 계산된 온도분포를 나타내었다. 식(1)의 수치해석에서 초기온도로서는 실제의 시험온도인 77 K로, 내·외부 FRP표면 즉 액체질소와의 경계면에서 경계조건은 단열조건으로 하였다. 이와 같은 단열 경계조건에 대한 타당성은 Fig. 6 a)의 계산결과에서 보는 바와 같이 내·외부 FRP표면인 r방향 좌표값이 0 mm (내부 FRP표면) 및 6.6 mm (외부 FRP표면)에서 발열이 종료되는 시각인 120 ms에서 경계면 주위의 액체질소 온도인 77 K와 동일하다는 사실로부터 그 타당성은 충분함을 알 수 있다. 또한 Fig. 1의 초전도한류소자의 구성 재료인 FRP 및 에폭시에 대한 열전도도 및 비열은 참고문헌 [4]의 데이터를, 그리고 Bi-2212 bulk의 열전도도 및 비열은 Fig. 7의 데이터를 각각 사용하였다. Fig. 6 b)는 상전도상태( $T > T_c = 90$  K)에서 Bi-2212 bulk 저항의 온도 의존성 데이터와 Fig. 5 a)의 전압 - 전류특성으로부터 측정된 온도를 나타내었다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 5구간 및 6구간에 대한 사고종료 시각인 120 ms에서 측정된 온도는 각각 ~128 K/168 K로 식(1)의 수치해석으로부터 계산된 온도인 ~138 K/165 K와 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 5구간 및 6구간의 임계전류의 불균일 정도는

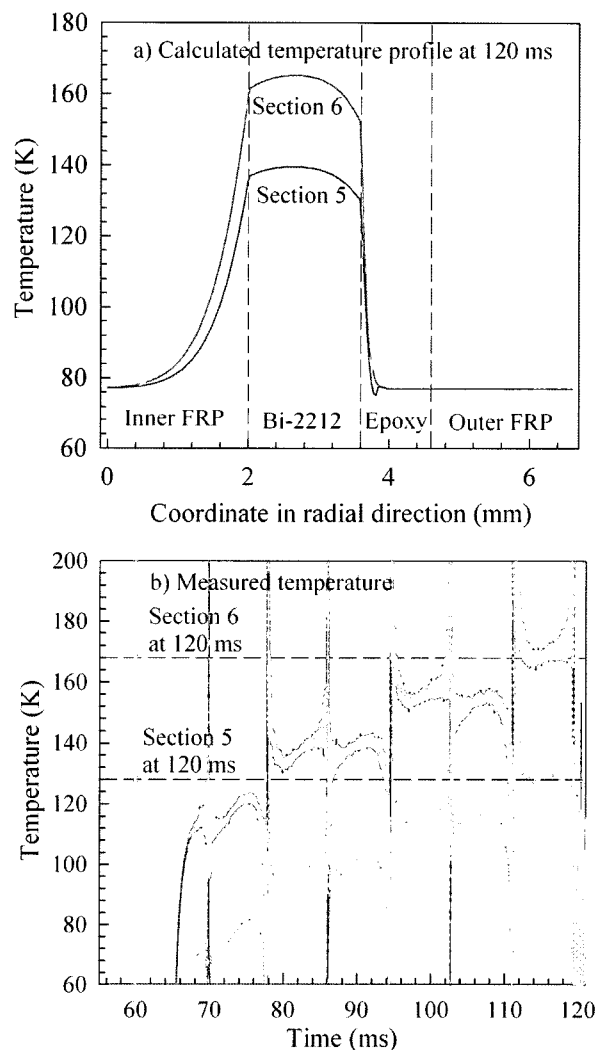


Fig. 6. Temperature of the Bi-2212 superconducting fault current limiting element in the sections 5 and 6 during fault.

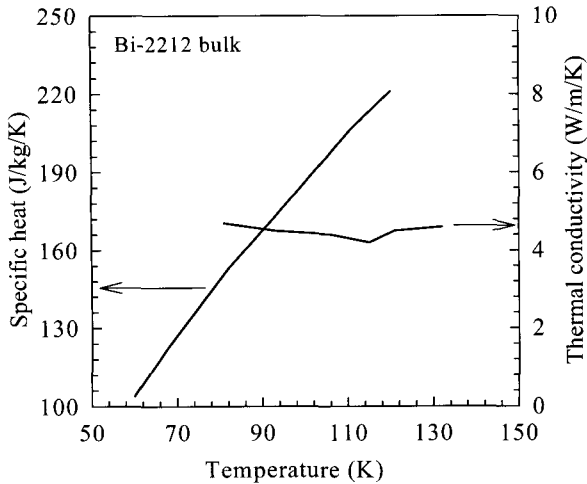


Fig. 7. Specific heat and thermal conductivity of the Bi-2212 bulk.

수% (Table 2 참조)임에도 불구하고, Bi-2212의 온도는 무려 40 K정도 차가 있음에 특히 주의를 요한다. 이는 곧 Bi-2212 초전도한류소자를 Table 1의 정격전압에서도 손상되지 않고 충분히 신뢰성이 있는 소자로 만들기 위해서는 Bi-2212bulk의 DC 전압 - 전류특성을 특히 균일하도록 제조해야 됨을 의미한다. 또한 Fig. 6 a)에서 보는 바와 같이 Bi-2212 bulk영역에서 온도분포가 FRP 및 에폭시에서와 비교해 평탄함을 볼 수 있으며, 이는 Bi-2212 bulk의 열전도도가 FRP 및 에폭시보다 크기 때문으로 설명될 수 있다. 또한 Bi-2212 bulk에서 발생된 열은 bulk의 외부방향으로보다는 내부로 더 빨리 확산되는 것을 볼 수 있는데, 이는 내부 FRP의 열전도도가 에폭시보다 큰 것에 기인한다. 이는 전력계통 사고 시 Bi-2212 bulk에서 필연적으로 발생되는 주열을 빠른 시간 내에 주변의 냉매로 빼내기 위해서는 전자력에 대한 구조재료인 FRP 및 에폭시의 열전도도를 가능한 한 크게 해 주어야 함을 의미한다.

Fig. 7에는 Table 1의 초전도한류소자에 대한 Fig. 6의 수치해석에 사용된 Bi-2212 bulk의 열적 특성을 나타내었다.

### 5. 결 론

이상의 22.9 kV/25 MVA급 초전도한류기 시스템용 Bi-2212 초전도한류소자에 대해 조사한 정상운전시 및 사고시의 중요 연구결과를 요약하면, 정격전류에서 Bi-2212 초전도한류소자 1개당 교류손실은 5.65 W로, 시스템의 총 교류손실은 763 W가 되며, 상용화를 위해서는 이의 ~1/10이하가 되도록 해야 한다.

또한 사고종료 시각에서 계산된 온도는 측정된 온도와 비교적 잘 일치하며, 특히 각 구간의 임계전류가 수%만 차이가 나도 발열파위는 수십%정도 불균일하게 되고, 궁극적으로는 국부적 온도차가 수십%정도로 크게됨을 알 수 있다. 이는 Bi-2212 초전도한류소자가 정격전압에서도 손상 (burn-out)되지 않고 충분히 신뢰성 있는 소자로 되기 위해서는 소자의 DC 전압 - 전류 특성이 그 무엇보다도 대단히 균일하도록 제조되어야 함을 의미한다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] X. Yuan, K. Tekletsadik, L. Kovalsky, J. Bock, F. Breuer, and S. Elschner, "Proof-of-Concept Prototype Test Results of a Superconducting Fault Current Limiter for Transmission-Level Applications," IEEE Trans. Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 1982-1985, 2005.
- [2] 류경우, 이주영, 마용호, 최병주, 박권배, 오일성 "고온초전도체의 DC 전압 - 전류특성," 한국초전도·저온공학회논문지, 8권, 3호, pp. 49-53, 2006.
- [3] 류경우, 마용호, "코일형 한류소자의 교류손실 특성," 전기전자재료학회논문지, 18권, 4호, pp. 370-374, 2005.
- [4] William H. Hayt, JR., "ENGINEERING ELECTROMAGNETICS," 5th edition, pp. 297-300, 1989.

### 저 자 소 개



마용호(馬勇虎)

1980년 6월 12일생. 2003년 7월 중국연변대학 전자정보통신학과 졸업. 2006년 2월 전남대학교 전기공학(공학석사). 2006년 3월부터 현재 전남대학교 전기공학과 박사과정.



이주영(李柱永)

1982년 6월 10일생. 2005년 7월 중국연변대학 전자정보통신학과 졸업. 2005년 8월부터 현재까지 전남대학교 전기공학(석사과정).



류경우(柳旻佑)

1962년 2월 10일생. 1983년 인하대 전기공학과 졸업. 1985년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 일본 Yokohama National Univ. 전자정보공학과 졸업(공학박사). 1986년~1995년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년~현재 전남대학교 전기공학과 부교수.



박권배(朴權培)

1972년 11월 09일생, 1998년 전남대학교 유전공학과 졸업, 2000년 전남대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 LS산전 전력연구소 주임연구원.



오일성(吳一成)

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