

## 15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류특성

### Characteristics of 15 kVA Superconducting Fault Current Limiters Using Thin Films

최효상\*, 현옥배\*, 김혜림\*, 황시돌\*

(Hyo-Sang Choi\*, Ok-Bae Hyun\*, Hye-Rim Kim\*, Si-Dole Hwang\*)

#### Abstract

We investigated resistive superconducting fault current limiters (SFCLs) fabricated using YBCO thin films on 2-inch diameter sapphire substrates. Nearly identical SFCL units were prepared and tested. The units were connected in series and parallel to increase the current and voltage ratings. A serial connection of the units showed significantly unbalanced power dissipation between the units. This imbalance was removed by introducing a shunt resistor to the firstly quenched unit. Parallel connection of the units increased the current rating. An SFCL module of 4 units in parallel, each of which has minimum quench current 25 A<sub>peak</sub>, was produced and successfully tested at a 220 V<sub>rms</sub> circuit. From the resistance increase, we estimated that the film temperature increases to 200 K in 5 msec, and 300 K in 120 msec. Successive quenches revealed that this system is stable without degradation in the current limiting capability under such thermal shocks as quenches at 220 V<sub>rms</sub>.

**Key Words** : Superconducting Fault Current Limiter (SFCL), Resistive SFCL, Shunt resistor  
Quench, Power dissipation

#### 1. 서론

고온 초전도 한류기는 크게 저항형과 유도형으로 나눌 수 있는데, 각 형태에 따라 다른 특성과 장단점이 있다. 유도형은 여러 가지가 있는 바, 대표적인 자기차폐형은 변압기의 2차 코일을 초전도 튜브로 단락시킨 형태로서 대용량화에 유리한 반면 기기의 크기가 크다[1]. 한편, 유도형 중 정류형 (혹은 dc reactor형)은 퀸치를 이용하지 않는다는 장점이 있는

반면, 전력전자의 고전압 및 고전류 대책 문제와 아울러 초전도 코일의 높은 경비 문제가 따른다. 저항형은 초전도체 퀸치시 저항이 발생함을 이용하는데, 크기가 작고, 한류 동작시 파형 변형이 적으며, 상대적으로 설치비가 낮을 것으로 기대된다[2-9]. 그러나 균일한 초전도체 제작이 쉽지 않고, 고전압, 열 및 기계적 충격을 극복해야 하는 부담이 남는다.

저항형 중 박막형은 YBCO 박막의 빠른 퀸치를 이용한다. YBCO 박막은 대단히 전류밀도가 높는데다 (약 3 MA/cm<sup>2</sup> 이상) 부피는 작아 (두께 수천 Å) 퀸치가 빠른 반면 열충격에 취약하다는 문제도 있다. 이런 이유로 박막형은 비교적 소용량인 배전선로급에 적합할 것으로 예측되고 있다.

저항형은 용량증대를 위해서 단위 한류소자를

\* : 한전 전력연구원 전력계통연구실  
(대전광역시 유성구 문지동 103-16, Tel : 042-865-5977, Fax : 042-865-5804, E-mail : hschoi@kepri.re.kr)

2000년 9월 20일 접수, 2000년 11월 24일 심사완료

직·병렬하는 과정이 필요한데, 특히 직렬연결시 각 한류소자의 켄치가 동시에 일어나도록 하여 급격한 열충격이 분산되도록 하여야 한다. 이러한 열발생은 초전도체의 종류에 따라 다르다. 예로서 Bi2223 막대형 한류소자는 박막형에 비해 전류밀도가 낮아 단위 부피당 상대적으로 열발생이 적고, 따라서 온도상승도 적다. 그럼에도 불구하고 어떤 형태이든 저항이 그리 크지는 않으므로 지속적인 켄치는 결국 다량의 열을 축적시켜 시편을 파괴할 수 있다. 이것이 초전도 저항형 한류기의 한계이며, 그러므로 차단기와 연계해서 사용해야 한다. 현재 국내 배전급 선로의 차단기는 흔히 5주기에 작동하므로 안전을 고려하여 7주기 동안 초전도 한류기가 정상적으로 동작하도록 하면 충분할 것이다.

본 연구에서는 YBCO 박막을 사용한 15 kVA급 한류기의 한류특성을 살펴보고, 배전급(22.9 kV) 한류기 개발을 위해 문제점을 짚어볼 것이다.

## 2. 한류소자 제작 및 단락실험 구성

본 실험에서 사용된 초전도 한류소자는 직경 2 inch의 sapphire 기판 위에  $YBa_2Cu_3O_7$  (YBCO) 박막을 두께  $0.3 \mu m$ 로 성장시킨 다음, 이를 meander 형으로 식각(lithography)한 것이다. YBCO 박막은 독일의 THEVA사가 제작하였다. 임계온도( $T_c$ )는 87 K이고, 임계전류밀도( $J_c$ )는 77 K에서  $3 MA/cm^2$ , 임계전류밀도( $J_c$ )의 지역별 분포는 최고 약 10 %의 차이를 보인다. 박막을 포함하여 초전도체는 재료의 불균일성 (inhomogeneity)으로 인하여 국부적으로 임계전류가 다를 수 있어 고전류 통전시 국소적으로 hot spot이 발생한다. 이러한 hot spot에서 발생하는 열을 분산시키기 위하여 YBCO 박막위에  $0.2 \mu m$  두께의 금을 *in-situ*로 증착하였다. 금 박막층은 상전도 상태의 YBCO보다 비저항이 훨씬 작기 때문에 (약 100분의 1) quench된 hot spot으로부터 전류를 우회시켜서 hot spot에서 국소적으로 발생하는 열을 줄여준다. 이외에 금 박막층은 YBCO 박막의 표면을 주변으로부터 보호하는 역할도 한다.

시편은 직·병렬 연결을 통한 용량증대 및 quench특성을 조사하기 위하여 그림 1과 같이 구성하되, 초전도 한류소자는 단위소자를 3개 직렬 및 4개 병렬로 구성하였다. 여기서 시편의 가장자리는 그림 1에서 보는바와 같이 임계전류밀도( $J_c$ )가 약간 불균일하여 사용하지 않고 전류공급을 위한 전류단자나 특성 측정을 위한 전압단자로 활용하였다. 직렬연결시의 단위소자는 stripe 길이 26 cm, 폭 1

mm이고 상온에서 저항값은  $39 \Omega$ 이었다. 병렬 연결을 위한 단위한류소자는 그림처럼 meander 형태로 이루어져 있으며 대전류 실험을 위하여 길이 42 cm, 폭 2 mm로 식각하였고, 실온 저항은 4개 소자 모두  $33 \Omega$ 이었다.

그림 1 YBCO 박막 단위한류소자 패턴 (선폭 2 mm)

Fig. 1 A current limiting element pattern using YBCO thin film (the width of a stripe : 2 mm)

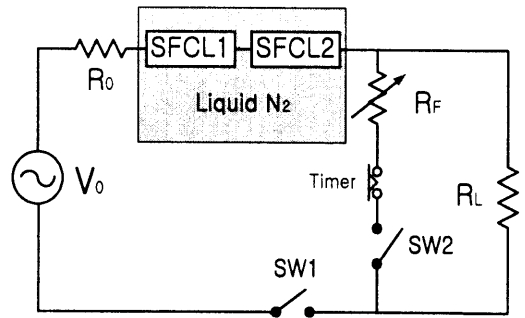


그림 2 실험회로도 (실험 목적에 따라 한류소자는 직·병렬 연결된다)

Fig. 2 Test circuit (current limiting elements are connected in series or parallel according to the experimental purpose)

그림 2는 실험에 사용한 측정회로도의 한 예를 보여주고 있다. 여기서  $V_0$ 는 전원전압,  $R_0$ 는 전체전류 측정을 위한 표준저항,  $R_F$ 는 사고전류를 제어하기 위한 조정저항, 그리고  $R_L$ 은 부하저항을 각각 나타

낸다. SFCL1과 SFCL2는 초전도 단위한류소자를 나타내며, 필요에 따라 직렬 혹은 병렬로 연결된다. 특히, 직렬연결시는 동시켄치 문제와 관련하여 특정 소자에 선트저항을 연결할 수도 있다. 정상상태 운전시 한류소자를 초전도 상태로 유지하기 위하여 액체질소 용기 내에 수직으로 설치된 채로 실험하였다.

실험과정을 보면, SW1을 닫아 정상상태 회로를 형성한 다음 SW2를 닫아 사고를 모의한다. 일정 시간(주로 3 ~ 7주기) 후의 전류값이 zero 점을 통과할 때 SW2를 열어주고 이어 SW1을 열어 한 과정을 끝낸다. 각 부분에서의 신호는 다중 채널 digitizer를 통해 기록되고 분석된다.

### 3. 단락실험 및 한류특성

초전도 한류기를 실제통에 적용하기 위해서는 직렬 및 병렬 연결을 통하여 전체적인 전류, 전압 용량을 높여야 한다. 먼저 직렬연결을 살펴보기로 한다. 이것은 그림 2와 같은 것으로 전압 등급을 높이는 데 쓰인다. 사전에 개별 단위소자의 켄치 특성을 보면 각 단위소자는 거의 동일한 시간에 동일한 방식으로 켄치됨을 알 수 있다(그림 3). 그림에서 보는바와 같이 시편이 켄치됨으로써 발생하는 전압 상승(저항 발생)에 있어서 시간차이는 0.1 msec 이내로서 대단히 작다.

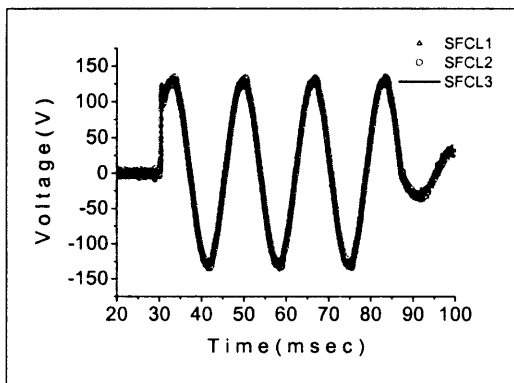


그림 3 개별 단위소자의 켄치 특성 (100 V<sub>rms</sub>)  
 Fig. 3 Quench characteristics of individual unit element (100 V<sub>rms</sub>)

그러나 이러한 단위소자를 직렬로 연결하면 상황은 달라진다. 그림 4에서 보여주는 바와 같이 전류가 증가함에 따라 SFCL1이 맨 먼저 quench를 수행

하고 SFCL2가 그 다음을 이어 quench되었다. 한편 나머지 다른 하나인 SFCL3는 사고직후 일시적으로 quench 되었으나 곧 켄치를 중단하여 저항 제로 상태로 복구하였다. 따라서, 열충격에 같은 모양으로 전개되어 SFCL1과 SFCL2가 인가된 모든 전력을 감당하게 된다. 열충격에 취약한 초전도체로서는 바람직하지 않은 것으로, 모든 단위소자가 동시에 켄치되도록 방안이 강구되어야 한다.

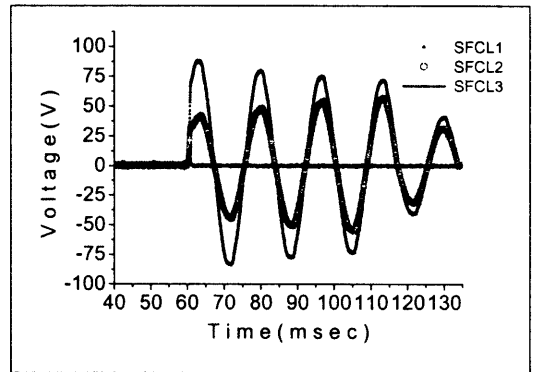


그림 4 단순 직렬연결시의 켄치특성 (100 V<sub>rms</sub>)  
 Fig. 4 Quench characteristics in simple serial connection (100 V<sub>rms</sub>)

한 개의 방안은 먼저 켄치되는 단위소자에 선트저항을 달아 power를 약간 분산시키는 방법이다. 실제로 3개의 단위소자(상전도 저항 39 Ω)를 직렬로 하였을 때 맨먼저 켄치되는 소자에 220 Ω의 선트저항을 부착함으로써 3개 단위소자 모두 동시에 켄치시킬 수 있었다. 이때 선트저항 220 Ω의 결정은 50 ~ 300 Ω까지 20 Ω의 단위로 단계적으로 실험한 결과 다음의 조건을 만족하는 적정저항값을 산출한 결과이다.

- (1) 사고직후의 충격을 완화하기 위하여 켄치 시작시점을 같게 할 것
- (2) 일정시간(여기서는 사고후 3주기 되는 시점) 후 한류소자의 켄치에 의한 저항값이 동일할 것

그 결과가 그림 5에 나타나 있다. 인가전압 300 V<sub>rms</sub>에서 사고전류는 420 A<sub>peak</sub>까지 상승할 수 있다. 그러나 한류소자의 켄치에 의해 전류가 켄치전류값인 10 A<sub>peak</sub>를 넘은지 0.3 msec만에 최고 17 A<sub>peak</sub>까지 증가한 후 서서히 감소하고 있다. 마찬가지로 최초의 전압 급상승 또한 0.3 msec만에 이루어지고

다[6].

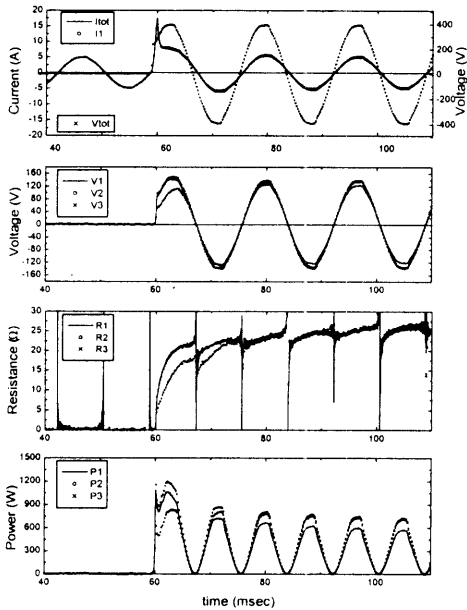


그림 5 SFCL1에 220 Ω 션트저항을 부착한 3개 단위 소자 직렬연결시 켄치 특성(300 V<sub>rms</sub>)  
**Fig. 5** Quench characteristics in serial connection of 3 SFCLs having a shunt resistor of 220 Ω into SFCL1 (300 V<sub>rms</sub>)

한편, 전류증대를 위해서는 단위소자의 병렬연결이 필요하다. 이 경우는 스스로 전류를 분류하므로 동시 켄치 문제는 없다. 폭 2 mm, 길이 42 cm, 상온저항 33 Ω인 단위 한류소자 4개를 병렬로 연결하여 220 V<sub>rms</sub>에서 단락실험을 행한 결과가 그림 6에 나타나 있다. 각 단위소자의 켄치전류는 25 A<sub>peak</sub>이므로 전체 한류소자의 켄치전류는 100 A<sub>peak</sub>이다.

그림 6은 7주기까지의 켄치 및 한류특성을 보여주고 있다. 사고전류는 최초 켄치 후 0.3 msec에 130 A<sub>peak</sub>까지 증가한 다음 그 이후로는 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 그 동안 단위소자의 저항은 7.5 주기에 30 Ω 까지 증가하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 단위소자의 온도도 77 K에서 5 msec 이내에 200 K, 그 이후는 천천히 증가하여 약 120 msec에 300 K까지 상승한다. 여기에는 없지만, 인가전압이 150 V<sub>rms</sub>이면 7.5 주기에 온도가 200 K까지만 상승한다.

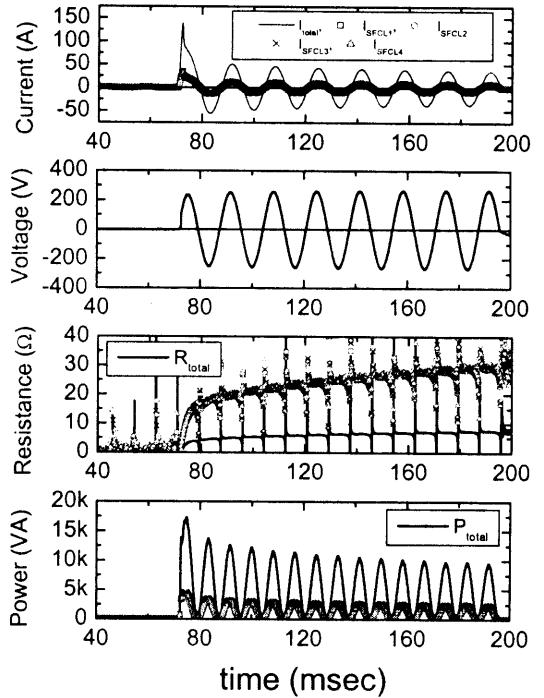


그림 6 15 kVA급 한류 소자의 켄치 특성  
**Fig. 6** Quench characteristics of a 15 KVA SFCL

#### 4. 토의 및 결론

저항형 초전도 한류기에서 사고시 켄치후 급속한 온도증가는 한류소자에 심각한 열 및 기계적 스트레스를 줄 수 있다. 이를 조사하기 위해 그림 3의 한류소자를 290 V<sub>rms</sub>에서 100회 이상 켄치실험을 통하여 소자의 온도를 550 K까지 급상승시키고, 액체질소로 급냉시켰음에도 불구하고 전류전압 특성에는 변화가 없었다. 그러나 300 V<sub>rms</sub>에서는 수회 켄치 후 초전도 meander선에 crack이 발생하여 사용상 한계를 보여주었다.

이러한 열충격에 대한 안정과는 별도로 소자의 회복 및 재투입 문제가 있다. 소자의 온도가 높을수록 냉각 또한 시간이 걸리므로 빠른 재투입을 위해서는 온도를 적절히 올려야 한다. 직렬 연결시 동시켄치 문제 해결을 전제로 소자온도를 200 K까지만 상승시키는 것이 용량증대와 재투입 시간을 동시에 고려한 최적조건일 수도 있다.

본 논문에서 15 kVA급 박막형 한류소자의 한류

특성을 논의하였다. 용량증대를 위해서는 박막의 대면적화, 균일한 초전도체, 직렬 연결시의 동시퀀치문제, 실계통의 경우 고속 한류시의 서지전압 등의 문제가 해결되어야 한다.

241(2000).

[9] 김혜림, 현옥배, 최효상, 황시돌, 김상준, "저항형 초전도 한류기에서의 퀀치 전파", 한국전기전자재료학회 논문지 13(4), 337(2000).

### 감사의 글

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행됨.

### 참고 문헌

[1] M. Chen, T. Baumann, P. Unternahrer and W. Paul, "Fabrication and characterization of superconducting rings for fault current limiter application", *Physica C*, 4, 282 (1997).

[2] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, P. Kummeth and H. W. Neumuller, "Resistive current limiters with YBCO films", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, 7(2), 828 (1997).

[3] B. Gromoll, G. Ries, W. Schmidt, H. P. Kramer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H. W. Neumueller, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO Films - 100 kVA Functional Model", *IEEE Trans. on Appl. Supercon.*, 9(2), 656 (1999).

[4] M. Lindmayer and H. Mosebach, "Current limiting properties of YBCO-films on sapphire substrates", *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, 9(2), 1369 (1999).

[5] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, 김상준, 문승현, 한병성, "YBCO 박막의 저항형 초전도 한류기에 대한 동작 특성", *대한전기학회 논문지*, 48B(10), 537 (1999).

[6] 현옥배, 최효상, 김혜림, 임해용, 김인선, "직렬연결된 초전도 한류기의 동시퀀치 현상", *대한전기학회 하계학술대회논문집*, B권, 663 (2000).

[7] 이호진, 김기백, 연제욱, 홍계원, 김기만, "다수의 접합경계를 갖는 Nb<sub>3</sub>Sn 케이블 접합부의 직류 저항 특성". *한국전기전자재료학회 논문지* 13(2), 170(2000).

[8] 임준형, 지봉기, 박형상, 주진호, 장미혜, 고태국, 이상진, 하홍수, 오상수, "Twisting된 Bi-2223 선재의 제조, 미세조직 관찰 및 임계 특성평가", *한*