

## Operating Properties for a Resistive SFCL of YBCO Thin Films

崔孝祥\* · 玄鉦培\* · 金蕙林\* · 黃時翌\* · 金相俊\* · 文勝鉉\*\* · 韓秉誠\*\*\*  
 (Hyo-Sang Choi · Ok-Bae Hyun · Hye-Rim Kim · Si-Dole Hwang · Sang-Joon Kim  
 Seung-Hyun Mun · Byoung-Sung Han)

**Abstract** - We fabricated a resistive superconducting fault current limiter (SFCL) of a meander type based on a YBCO film with the meander cross section of  $5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ , and performed current limitation experiments. The film was coated with a gold shunt layer in order to disperse the heat generated at hot spots in the YBCO film. For  $0^\circ$  fault the minimum quench current was  $9.6 \text{ A}_{\text{peak}}$  at 60 Hz, and the fast quench time was 0.63 msec. The resistance of the limiter continuously increased for three cycles due to the temperature rise in the gold layer. The temperature of the current limiting element reached the room temperature in 11 msec,  $150^\circ \text{C}$  in 54 msec after quench, and was saturated afterwards. For  $45^\circ$  and  $90^\circ$  faults the fast quench times were 0.56 msec and 0.26 msec, respectively. The quench time is believed to be reduced because the faults occurred when the current was either increasing or at the peak value. This limiter effectively limited the fault current to about 1/5 of the potential current with no SFCL right after the fault and to about 1/8.5 in three cycles. We confirmed that the gold layer effectively carried out the role of heat dissipation as the SFCL was quenched.

**Key Words** : Superconducting fault current limiter, YBCO film, Hot spot, Quench time, Heat dissipation

### 1. 서 론

전력수요의 급격한 증가와 더불어 대단위 발전설비가 발전소 적정부지 요건에 따라 수용가와 멀리 떨어진 곳에 설치됨으로써 전력전송 용량이 날로 증가하고 있으며, 뇌격전압이나 자연재해시 수목의 접촉등에 의한 고장용량도 필연적으로 증가하고 있다. 이와 같은 송전선로의 고장은 전력계통에 순간적으로 매우 큰 고장전류가 흐르도록 하는데, 이러한 고장전류는 대개 보호계전기등과 같은 검출장치를 거쳐 차단기가 제거하지만, 차단기의 동작한계시간인 3~5 cycle 동안 전력계통에 직렬로 연결되어 있는 각종 전기적 장치의 손상을 가져오고 있다. 더욱이 송전급 송전선의 경우 고장전류는 현재 설치된 차단기의 차단 한계용량에 접근하거나 차단용량을 초과할 것으로 전망되어서 점점 더 심각한 문제점으로 부각되고 있다. 한편 기존에 사용된 과전류 차단장치에는 전력용 한류 리액터, 전력용 퓨즈 그리고 전력용 한류 와이어 등이 있고, 차단방법으로서 고임피던스 변압기 채용과 모션분리 운전등이 고려되고 있으나 어느 것도 경제성과 효율면에서 개선해야 할 점이 많다[1].

초전도 한류기는 초전도체가 quench 되면서 발생하는 높은 임피던스를 이용하여 사고전류를 제한하는 기기로서 별도의 부가장치가 필요하지 않다. 또한 동작이 빠르고 회복시간이 짧으며 수명이 반영구적인 점 등 다른 장치로 대체할 수 없는 초전도만의 특성 때문에 그 효용가치는 대단히 높다. 초전도 한류기는 그 한류방식에 따라 크게 유도형과 저항형으로 나눌 수 있다. 유도형은 용량증대에 유리하여 대용량화가 용이한 반면 기본구조상 필연적으로 철심 등의 core를 사용하여야 하기 때문에 크기가 커지고 hysteresis 손실 및 eddy current 손실 등의 철손을 극복해야 하는 단점을 가지고 있다. 저항형은 구조 및 원리가 간단하고 quench 시간이 빠른 점 등 유도형과 차별화된 장점들 때문에, 독일의 Siemens AG 그룹[2-3] 등에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 박막을 이용한 저항형 한류기는 소형화 및 적층구조를 통한 compact화가 용이하기 때문에 관심을 불러 일으키고 있다[4-8].

본 연구에서는 YBCO 계열 초전도 박막을 이용한 저항형 한류기를 meander 형태로 설계하고, 과도상태의 접두값과 소비전력을 분담하기 위하여 박막위에 gold 층을 입힌 경우에 대하여 전력계통에서 발생하는 사고에 대해 회로를 구성하여 모의하였다. 자체 제작한 고장전류 발생장치를 통하여 사고 발생 모의 위상각별 고장을 발생시킨 후 사고직후의 quench 특성 및 전류제한 특성을 알아 보았다[9].

\* 正 會 員 : 韓國電力公社 電力研究院 電力系統研究室

\*\* 正 會 員 : LG 綜合技術院 責任研究員

\*\*\* 正 會 員 : 全北大學校 電氣工學科 教授

接受日字 : 1999年 7月 23日

最終完了 : 1999年 9月 13日

## 2. 실험 방법

### 2.1 시편 제작

본 실험에 사용한 고온 초전도 한류소자는 직경 2 inch의 LaAlO<sub>3</sub> 기판 위에 성장된 두께 4000 Å의 YBCO 박막을 바탕으로 하여 제작하였다. 박막은 단면 박막을 사용하였으며 임계온도와 임계전류는 각각 약 87 K와 1.0 MA/cm<sup>2</sup>이다. 가공하기 전의 박막 표면에 대한 배율 50배의 광학현미경 사진을 그림 1에 나타내었다. Boulder 없는 비교적 깨끗한 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. YBCO 박막은 열분산이 취약하고, 제조공정상 위치에 따라서 약간 불균일한데, 이러한 불균질성(inhomogeneity)으로 인하여 hot spot이 생성된다. 이로 인하여 국소적으로 초전도체에 열이 발생하는데 그 정도가 심하면 초전도체가 용단(melting)될 수 있다. 이러한 끊어짐을 방지하고 hot spot의 열적 및 전기적 분포 역할을 담당하기 위하여 YBCO 박막 위에 약 4000 Å 두께의 gold를 sputtering으로 증착하였다. Gold가 증착된 YBCO 박막을 photolithography를 이용하여 폭 1 mm, 간격 0.5 mm, 그리고 길이 5 cm의 meander line 모양으로 식각하여 초전도 한류소자를 제작하였다. 상온에서의 초전도 한류소자의 저항은 6.3 Ω이었다. 아래 그림 2는 완성된 초전도 한류소자의 사진을 보여주고 있으며, 여러 번의 실험을 위하여 3개의 section으로 구분하여 설계하였다. 그림 3은 그림 2에 표시한 부분에 대한 시험단자의 구성을 보여준다.

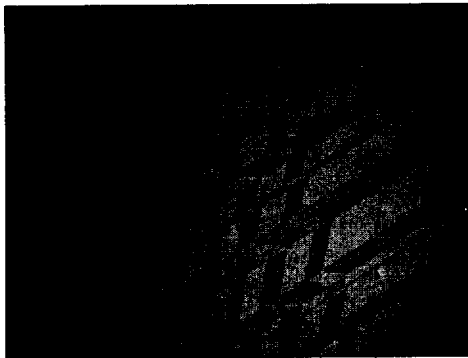


그림 1 YBCO film의 광학현미경 사진  
Fig. 1 An image of the YBCO film

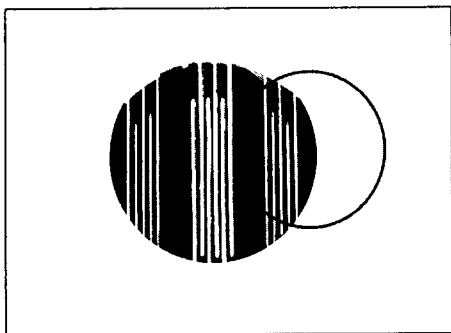


그림 2 완성된 한류소자의 사진  
Fig. 2 The current limiting element

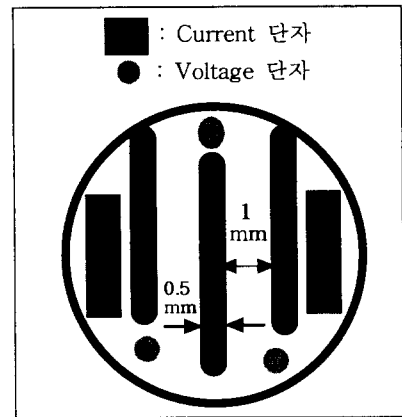


그림 3 초전도 한류기의 설계패턴  
Fig. 3 An SFCL design

### 2.2 시험 시스템 장치

Quench 및 전류제한특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 4에 나타내었다. 그림에서  $V_0$ 는 전원전압이고, 직렬저항  $R_0$ 은 전압변화를 측정하기 위한 표준저항이며, 한시동작 점점(timer)은 과전류에 의한 박막의 소손을 방지하기 위한 개폐기이다. SFCL은 저항형 초전도 한류기를 나타내며 분로저항  $R_1$ 은 초전도체의 quench시 분로의 역할을 하는 gold층의 저항을 모의한 것이다. 본 연구에서는 초전도체와 coating된 gold와의 접촉을 최소화하는 공정을 통하여 한류소자를 제작하였다. 한편  $R_L$ 은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며, SW<sub>1</sub>는 1선지락과 같은 계통 고장시험을 수행하기 위한 스위치이다. 시험 시스템에 대한 회로방정식은 다음과 같다. 식 (1)은 SFCL이 초전도 상태일 때를 나타내고, 식 (2)는 SW<sub>1</sub>이 닫힘으로써 SFCL이 quench 되었을 때를 표시하며, 식 (3)은 인가전압이다.

$$V_0 = (R_0 + R_L) i \quad (1)$$

$$V_0 = (R_0 + \frac{R_1 R_{YBCO}}{R_1 + R_{YBCO}}) i \quad (2)$$

$$V_0 = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

회로소자 값은 박막의 임계전류 및 한류특성을 고려하고 최초 quench 조건 및 최종 한류 조건을 감안하여 적절한 값으로 결정하였다. 시스템의 정격전압  $V_0$ 는 1~65 V<sub>rms</sub>/60 Hz까지 변화하면서 가해 주었다. 측정을 위한 표준저항  $R_0$ 은 1 Ω, 부하저항  $R_L$ 은 3.8 Ω과 가혹한 조건의 시험을 위하여 7.7 Ω을 연결하였다. 실험 전 과정에서 SFCL 부분은 액체질소 속에 잠겨 있도록 하였다.

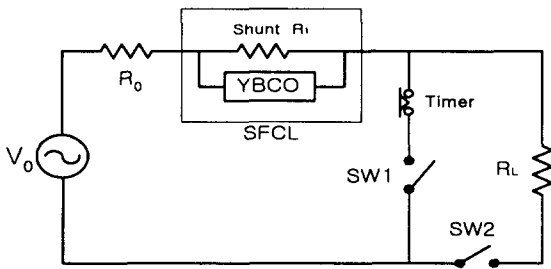


그림 4 측정을 위한 회로 시험장치  
**Fig. 4** A current limitation experiment circuit with an SFCL

### 3. 결과 및 고찰

전력계통에서 외부요인에 의한 계통 사고시 사고전류가 차단기의 차단내력을 초과할 때, 초전도 한류기의 1차적인 역할은 사고전류의 빠른 차단과 초전도성 회복이다. 이중 초전도성 회복은 차단기의 재투입이나 영구고장의 경우에 고려하여야 할 중요한 요소이며, 이에 대한 연구는 현재 진행중에 있다. 따라서 이번 논문에서는 meander 형태의 저항형 한류기에서 중요한 요소인 임계전류, quench 시간 및 전류제한 효과 등에 대하여 고찰하였다.

그림 5는 인가전압  $V_0$ 를 11 V<sub>peak</sub>, 표준저항  $R_0$ 를 1 Ω, 부하저항  $R_L$ 를 3.8 Ω, 사고모의 위상각 0°로 하였을 때, 초전도체에 최소의 전류에서 quench가 발생한 경우에 대하여 인가 시간에 대한 전기적 특성 파형을 나타내고 있다. 그림에서 고장점에는 fault, quench 시작점에는 quench라고 색인하였다. 그림 5 (a)에서 사고가 발생하기전 정상전류값은 2.3 A<sub>peak</sub>를 나타내었으며, 선로고장을 발생시켰을 때 9.6 A<sub>peak</sub>의 전류값에서 최초로 quench가 발생한 후 점차 전류크기가 감소함을 볼 수 있다. 그림 5 (b)에서는 quench 직후 초전도체 양단에 전압이 발생하여 서서히 증가하는 상태를 보여주고 있다. 한편 그림 5 (c), 5 (d)에는 그림 5 (a) 및 그림 5 (b)로부터 SFCL의 저항 및 소비전력을 계산하여 나타내었다. 저항값과 소비전력 파형은 인가한 시간이 증가함에 따라 서서히 증가함을 볼 수 있다(그림 5 (c)의 저항곡선에서 보이는 주기적인 spike 신호는 인가된 교류전압 및 전류의 zero값에서 기인한 계산상의 noise임). 그림 6에 최초 quench 시점의 전류 및 전압변화값을 확대하여 보여준다. 고장발생후 3.2 msec 후에 quench가 발생하였으며, 저항발생 메커니즘을 살펴볼 때 meander line의 형태에 따른 부분적인 quench가 발생한 다음 시간이 지나면서 완전한 quench로 진행되는 것으로 보인다. 따라서 소비전력도 이 시간동안에 증가하였다. 그림 5와 6을 종합해 볼 때 선로고장에 따른 quench 발생 후 YBCO 초전도체의 shunt 저항으로 작용하는 gold층으로 대부분의 전류가 흐르게 되고, 이로 인해 열이 발생하여 저항이 증가하였으며 이에 따른 전류감소, 전압증가 및 소비전력증가가 발생한 것으로 생각된다. Gold층의 저항증가는 냉매로 작용하는 액체질소에서 충분한 냉각이 이루어지지 않기 때문이며 약 3주기 이후에는 일정한 값으로 포화됨을 확인할 수 있었다. 그림 7에 실험회로(그림 4)에서 초전도 한류기를 적용하지 않았을 때와 초전도 한류기를 적용한 경우에 대하여 비

교 파형을 나타내었다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 최대 사고전류값은 11 A<sub>peak</sub>이었으며, 초전도 한류기를 적용한 경우는 최대 한류전류값이 9.6 A<sub>peak</sub> 값을 보였다가 서서히 감소함을 볼 수 있다.

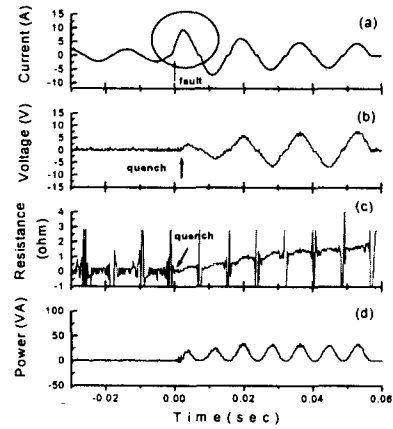


그림 5 Quench 시점의 전기적 특성  
**Fig. 5** Electrical signals at minimum quench current

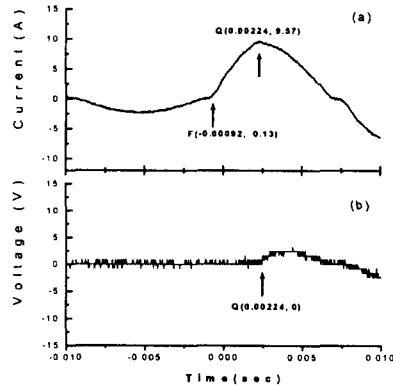


그림 6 Quench 시점의 확대파형  
**Fig. 6** Waveforms at the quench

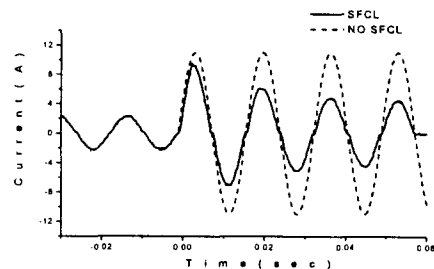


그림 7 고장발생시 사고전류 및 한류파형  
**Fig. 7** Fault current and limited current waveforms at fault

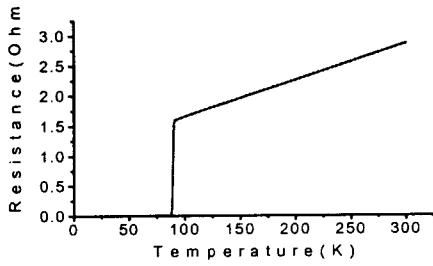


그림 8 초전도 한류소자의 온도에 따른 저항변화 ( $T_c = 87$  K)

Fig. 8 Resistance vs temperature of SFCL element ( $T_c = 87$  K)

그림 9는 사고모의 위상각  $0^\circ$  에서 인가전압  $V_0 = 65$  V<sub>peak</sub>를 가지고, 표준저항  $R_0$ 는  $1 \Omega$ , 부하저항  $R_L$ 을  $7.7 \Omega$ 로 하였을 때 초전도 한류기 양단에 걸리는 전기적 특성을 보여준다. 그림 9 (a)에서 사고전류값이 최고  $13.0 A_{peak}$ 까지 상승하는 과도응답을 보인 후에 효과적으로 사고전류제한을 수행함을 볼 수 있다. 그림 9 (b), 9 (c)는 quench 발생 후 한류소자에 전압과 저항이 발생하는 메카니즘을 보여준다. Gold층의 열발생에 기인하여 사고후 점진적으로 전압과 저항값의 상승을 보이다가 일정한 값에 도달하였다. 한편 그림 8에 초전도 한류소자의 온도에 따른 전기저항 측정결과를 보여주며 전기저항값은 온도 증가 및 감소의 양방향으로 측정된 결과이다. Gold층의 저항이 상온에서  $6.3 \Omega$ 인 것을 감안하면 사고발생 후 약 11 msec 후에 상온에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 약 3 주기후인 54 msec되는 지점에서는 저항이  $8.9 \Omega$  이었다. 이를 그림 8의 그래프에서 측정시편의 길이(2.2 cm)를 고려하여 온도로 환산하면 약  $150^\circ C$  정도됨을 알 수 있다. 이 이후의 저항발생은 그림 9의 (d)에서와 같이 소비전력이 감소하기 때문에 더 이상의 큰 온도상승은 없을 것으로 생각되며, 또한 실계통에서는 차단기가 동작하여 회로를 개로하기 때문에 실제적인 의미는 없다. 소비전력을 나타내는 그림 9 (d)는 상용주파수의 2배주기로 점진적으로 감소하다가 일정한 값을 보여 주었다.

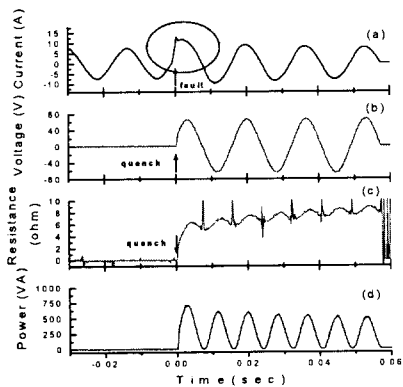


그림 9 예상사고전류  $65 A_{peak}$ 에서의 전기적 특성

Fig. 9 Electrical properties at the potential fault current  $65 A_{peak}$

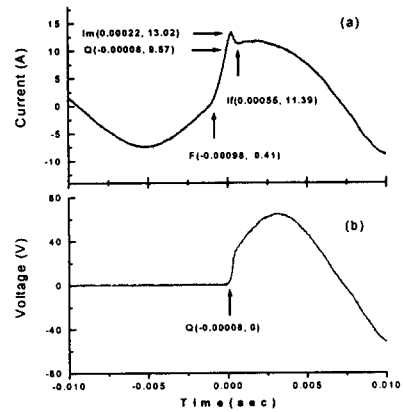


그림 10 Quench 시점의 확대파형

Fig. 10 Waveforms at the quench

한편 그림 9의 전류 전압 파형을 확대한 그림 10의 (a)를 보면 사고모의 위상각  $0^\circ$  에서 최초 사고가 발생(F지점)한 후 약 0.9 msec 후에 Q 지점 (전류값  $9.6 A_{peak}$ )에서 quench가 발생하는 것을 보여준다. 이후 사고전류의 급격한 상승에 따라 인가전류는 최고  $13.0 A_{peak}$ 값(최대 한류전류값,  $I_m$  지점)을 보였다가 quench 종결지점인  $I_f$ 에서  $11.4 A_{peak}$ 를 나타내었다. 이때 fast quench 시간은 0.63 msec 이었다. 그림 10 (b)에서 fast quench가 진행되는 동안의 급격한 전압상승을 관찰할 수 있으며, 이후 한류소자의 열발생에 따라 파형이 점진적으로 변화하는 모습을 볼 수 있다. 그림 11은 그림 9의 사고발생 조건에서 초전도 한류기를 부착한 경우와 부착하지 않았을 때의 전류파형을 나타낸다. 초전도 한류기를 부착하지 않은 경우 사고발생 후 최고  $65 A_{peak}$ 의 전류값을 보여주어, 초전도 한류기를 적용한 경우의 최대값인  $13.0 A_{peak}$ 에 대하여 약 5배, 3주기후의 안정된 전류값인  $7.6 A_{peak}$ 에 대하여 약 8.5배의 상승값을 나타내었다. 한편 같은 조건하에서 사고모의 위상각  $45^\circ$  와  $90^\circ$  인 경우를 그림 12에 보여준다. 사고모의 위상각  $45^\circ$  와  $90^\circ$  에서는 전류값이 상승도중 혹은 최고값에서 사고가 발생하기 때문에 최대전류값이  $14.0 A_{peak}$  와  $15.3 A_{peak}$ 를 나타내었으며 quench 시간도 0.56 msec와 0.26 msec를 각각 보여주었다.

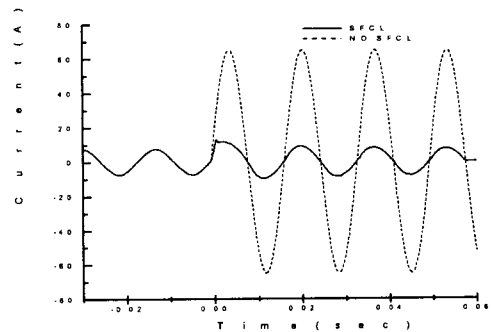


그림 11 고장발생(사고 위상각  $0^\circ$ )시 사고전류 및 한류파형

Fig. 11 Potential fault current and limited current waveforms at the  $0^\circ$  fault

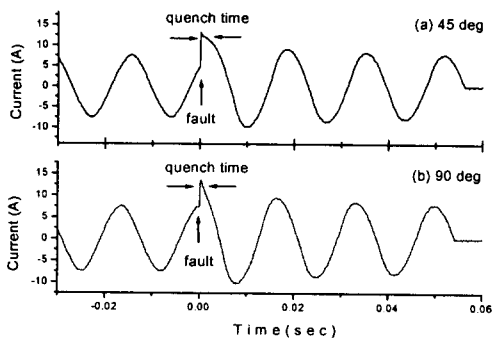


그림 12 사고모의 위상각별 전류제한 파형 (45°, 90°)

Fig. 12 Limited current waveforms at fault angles 45° and 90°

Gold 박막이 초전도 켄치에 미치는 영향을 보기 위하여 일부 meander line은 gold 박막으로 덮지 않은채 YBCO 박막을 노출시켰고, 몇 개의 meander line은 line의 대부분은 gold 박막으로 덮고 일부는 YBCO 박막을 노출시켰으며, 나머지 meander line은 YBCO가 노출된 부분이 없이 line 전체를 gold 박막으로 덮은 상태에서 실험을 하였다.

YBCO 박막이 노출되어 있는 부분이 있는 meander line은 임계전류를 넘는 순간 용단되어 켄치된 상태를 1 ms도 유지하지 못하였다. 그림 13은 이러한 meander line에 임계전류 이상의 전류가 흘렀을 때 용단된 부분의 사진인데 두 경우 모두 YBCO 박막이 노출된 부분에서 용단이 일어나고 있으며, 이러한 상태에서는 켄치상태를 유지하기 어려움을 보여 준다.

Gold 박막으로 덮힌 meander line은 임계전류 이상의 전류를 통전하였을 때에 용단되지 않았으며 켄치된 상태에서 3 사이클 이상 유지하였다. 과도한 전류(예상 고장전류 약 65 A<sub>rms</sub>)가 흘렀을 때에야 용단되었고 이 때에도 용단되기 전에 3 사이클 가량 켄치상태를 유지하였다. 그림 14는 용단이 일어나기 전후의 용단된 부분의 사진이다. 두 사진을 비교하면 gold 박막이 가장 적게 덮여 있는 곳에서 용단되었음을 확인 할 수 있다. 따라서 YBCO 한류소자위에 증착한 gold 층이, 고장전류의 발생에 의하여 초전도체가 quench 되었을 때, 전기적으로 shunt 회로역할을 수행하고 있음을 알 수 있다.

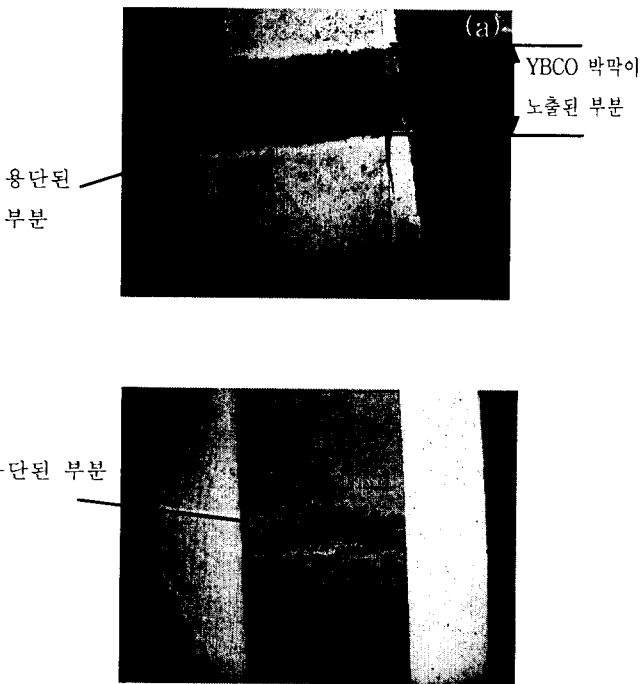


그림 13 YBCO가 노출된 meander line에서 용단된 부분의 사진

- a) YBCO가 일부만 노출된 경우(고장 전류 7.5 A<sub>rms</sub>)
- b) YBCO가 모두 노출된 경우(고장 전류 13 A<sub>rms</sub>)

Fig. 13 Micrographs of the melted parts of the meander lines

- a) The line where the YBCO film is partially exposed (fault current 7.5 A<sub>rms</sub>)
- b) The line where the YBCO film is fully exposed (fault current 13 A<sub>rms</sub>)

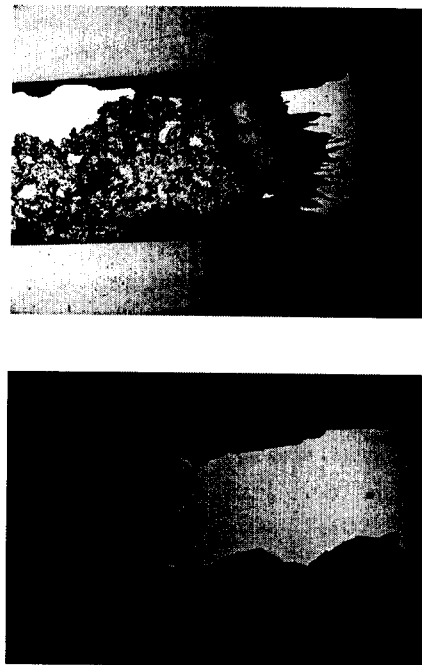


그림 14 전 구간에 gold 박막이 덮힌 meander line에서 용단된 부분의 사진

- a) 용단된 후
- b) 용단되기 전

Fig. 14 Micrographs of the melted part of the meander lines covered with a gold layer

- a) After melted
- b) Before melted

4. 맺 음

전력계통에서 빈번하게 발생하는 사고전류에 대한 억제 및 차단기의 차단내력을 향상시키는 방안으로 연구되고 있는 초전도 한류기 중에서, YBCO film을 이용한 meander 형태의 저항형 한류기를 설계하고 quench 특성 및 전류제한 특성을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

인가전압이 11  $V_{peak}$ 이고  $R_0$ 는 1  $\Omega$ ,  $R_L$ 을 3.8  $\Omega$ 으로 하였을 때 정상전류는 약 2.3  $A_{peak}$  이었으며 고장발생후 3.2 msec 후에 9.6  $A_{peak}$ 의 전류값에서 최초 quench가 발생하였다.

인가전압  $V_0=65 V_{peak}$ 이고  $R_0$ 는 1  $\Omega$ , 그리고  $R_L$ 을 7.7  $\Omega$ 으로 하였을 때 사고모의 위상각 0°에서 고장발생후 0.9 msec 후인 9.6  $A_{peak}$  되는 지점에서 quench가 발생하여 13.0  $A_{peak}$ 의 최대 한류전류값을 보인후 11.4  $A_{peak}$ 의 전류값에서 fast quench가 완료되었다. 이때 quench 시간은 0.63 msec이었다. 저항값은 gold층에서 발생한 열때문에 점진적인 상승을 보이다가 약 3주기후에 일정한 값에 도달하였다. 한류소자의 온도는 약 11 msec 후에 상온에 도달하였으며, 3 주기 후인 54 msec에는 150 °C까지 상승하였다. 초전도 한류기를 적용하지 않은 경우 사고전류는 최고 65  $A_{peak}$ 까지 상승하였고, 초전도 한류기를 적용했을 때 최대 한류전류값 13.0  $A_{peak}$ 에 비해 약 5배, 3주기후의 안정된 전류값인 7.6  $A_{peak}$ 에 대해 8.5배의 상승값을 나타내었다. 사고모의 위상각 45°와 90°인 경우는 전류값이 상승도중 혹은 최고점에서 사고가 발생하기 때문에 최대 한류전류값이 각각 14.0  $A_{peak}$ , 15.3  $A_{peak}$ 을 보였으며 quench 시간은 각각 0.56 msec와 0.26 msec를 나타내었다.

YBCO 초전도 한류소자위에 gold층을 증착하지 않은 경우는 quench 후에 곧바로 용단되었으며, 부분적으로 gold층이 덮여 있는 시편에서는 YBCO 박막이 노출된 부분에서 용단이 발생하였다. 반면 gold 박막을 입힌 meander line은 임계전류 이상의 전류를 통전하였을 때에 용단되지 않았으며 켄치된 상태에서 3 사이클 이상 유지하였다. 과도한 전류(예상 고장전류 약 65  $A_{rms}$ )가 흘렀을 때에야 켄치후 3 사이클 지나 용단되었다. 이러한 YBCO/gold에 의한 초전도 한류기의 용량은 gold에 발생하는 열을 gold가 감당할 수 있는 전류의 크기와 관련이 있으며, gold층이 YBCO 한류소자가 quench 되었을 때 발생하는 열을 효과적으로 분산시킬 뿐만 아니라 전기적으로 shunt 회로 역할을 하고 있음을 확인할 수 있다.

이에 더하여 앞으로 quench 후 한류소자에 발생하는 주울 열의 발생 메카니즘 및 저감대책에 관한 연구와 좀더 효율적인 한류소자 구성에 대한 연구를 병행하고자 한다.

본 연구가 진행되는 동안 YBCO 박막 식각에 도움을 준 표준과학연구원의 김인선, 임해용 연구원께 감사드립니다.

본 연구의 일부분은 과학기술부 중점연구개발 사업으로부터 연구비 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Eddie Leung, "Surge protection for power grids", IEEE Spectrum, Vol. 34. No. 7, pp. 26-30, 1997.
- [2] W. Schmidt, *et al.*, "Preparation of YBCO thick films by pulsed laser deposition for a superconducting fault current limiter", Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 631-634, 1995.
- [3] B. Gromoll, *et al.*, "Resistive fault current limiters with YBCO films", presented at ASC '98, Palm Desert, CA, USA, Sep. 14-18, 1998.
- [4] G. Ries, *et al.*, "Development of resistive HTSC fault current limiters", Inst. Phys. Conf. Ser. No. 148, pp. 635-638, 1995.
- [5] B. C. Min, *et al.*, "Double-sided  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  thin films on 2-inch  $LaAlO_3$  wafers by pulsed laser deposition", KCMAS '97, Vol. VII, pp. 233-236, 1997.
- [6] Thomas P. Sheahen, "Introduction to high-temperature superconductivity", Plenum Press, pp. 349-372, 1994.
- [7] B. Gromoll, *et al.*, "Resistive current limiters with YBCO films", IEEE Trans. on App. Supercon., Vol. 7, No. 2, pp. 828-831, 1997.
- [8] T. Kiss, *et al.*, "Quench characteristics in HTSC devices", presented at ASC '98, Palm Desert, CA, USA, Sep. 14-18, 1998.
- [9] Hyo Sang Choi, *et al.*, "The characteristics of a superconducting fault current limiter with YBCO films", KCMAS '98, Vol. 8, pp. 291-295, 1998.

저 자 소 개

**최 효 상 (崔孝祥)**

전기학회 논문지 제48B권 제4호 참조  
Tel : (042) 865-5977, E-mail : hschoi@kepri.re.kr

**현 옥 배 (玄錡培)**

전기학회 논문지 제48B권 제4호 참조



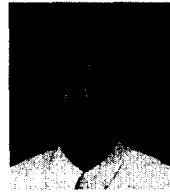
**김 혜 림 (金蕙林)**

1957년 3월 15일 생. 1979년 서울대학교 물리학과 졸업(이학사). 1981년 미 아이오와 주립대학교 대학원 물리학과 졸업(석사). 1991년 미 코넬대학교 대학원 물리학과 졸업(박사). 현재 한전 전력연구원 선임연구원. 관심분야: 초전도 전력 응용.



**황시돌 (黃時玆)**

1957년 01월 12일생, 1981년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 근무



**문승현 (文勝鉉)**

1964년 9월 23일생, 1987년 서울대 물리학과 졸업, 1989년 서울대 물리학과(이학석사), 1994년 서울대 물리학과(이학박사), 현재 LG 종합기술원 책임연구원, 주 관심분야 : 고온초전도 소자, 산화물 박막 등



**김상준 (金相俊)**

1951년 2월 7일생, 1986년 서울산업대 전기공학과 졸업, 1987년 발송배전 기술사, 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 장영실상 수상, 현재 한전 전력연구원 전기이용기술그룹장, 주 관심분야 : 고온초전도, 전력케이블, 전기재료, 설비진단, 고전압 등

**한병성 (韓秉誠)**

전기학회 논문지 제48C권 제6호 참조