

## 고온 초전도 퓨즈의 한류 및 방전 특성

### Current Limiting and Discharge Characteristics of High Tc Superconductive Fuse

최효상<sup>1,a</sup>

(Hyo-Sang Choi<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

We present the basic properties of a superconductive fuse (SF) based on YBCO/Au films. The SF consists of YBCO stripes covered with Au layers for current shunt. The fault current was limited to a designed value in less than 0.4 msec by resistance development in YBCO/Au upon quenching. This enabled the SF to transfer small fault power and the suppressed current was sustained for more than 0.5 msec while Au layer melting and arcing. The arcing time was less than 2.5 msec, that is short enough to do self-interruption. Under the source voltage of 100 V<sub>rms</sub>, the longer the duration time of fault current was, the shorter its discharge time was. The duration time of fault current and its discharge time were reduced by increased voltages in the range of 200 - 300 V<sub>rms</sub>. We thought that this was because the quench propagation was limited by local melting generated with higher voltage.

**Key Words** : Superconductive fuse, YBCO stripe, Current limiting and discharge, Self-interruption

#### 1. 서 론

최근 전력수요의 지속적인 증가와 함께 전력계통이 대용량화 및 복잡화함에 따라 계통운용의 높은 신뢰성과 안전성 확보가 점점 더 요구되고 있다. 이러한 전력계통에 단락사고가 발생하면 단락전류로부터 수반되는 이상전압과 이상전류는 전기설비의 손상이나 절연파괴를 야기하게 되어 계통의 불안정 및 장치폭발 등의 사고를 유발하게 된다. 이와 같은 단락전류의 제거는 1차적으로 차단기를 들 수 있으나, 차단기는 재투입이 가능한 장점을 가진 반면 최소 5주기 이상의 시간이 소요되고 장치가 크며 가격이 비싼 단점이 있다. 다음으로, 2차적인 단락전류 제거장치는 컷아웃 스위치, 파워퓨즈 및 한류퓨즈 등이 사용되고 있다. 컷아웃

스위치와 파워퓨즈는 차단기에 비해 상당한 경제성을 확보하고 있으나 1회용으로 밖에 사용할 수 없고 단락전류의 차단 및 소호시간이 길어지는 단점을 갖고 있다. 한편, 한류퓨즈도 1회용으로 밖에 사용할 수 없는 단점을 가지고 있으나, 단락전류를 한류시키는 점과 동작 I<sup>2</sup>t가 차단기나 컷아웃 스위치 및 파워퓨즈에 비해 작기 때문에 연구자들에게 많은 관심을 끌고 있다[1-3].

한편, 퓨즈에 대한 새로운 시도로서 초전도체를 이용하는 방법이 있다. 초전도체는 정상상태에서 저항이 완전히 영인 특성을 가지고 있다. 따라서 손실이 거의 없기 때문에 작은 크기의 도체에 많은 전류를 통전하는 것이 가능하게 된다. 이러한 초전도체만의 장점인 고전류밀도를 이용하여 새로운 개념의 초전도 전력기기를 개발하고자 하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다[4-5]. 본 논문에서는 한류퓨즈의 새로운 형태로서, 아직까지 연구가 거의 되어있지 않은 초전도 한류퓨즈에 대한 실험결과를 토대로 하여 한류 및 방전 특성을 고찰하고자 한다.

1. 조선대학교 전기공학과

(광주시 동구 서석동 375)

a. Corresponding Author : hyosang@chosun.ac.kr

접수일자 : 2004. 2. 27

1차 심사 : 2004. 3. 16

심사완료 : 2004. 4. 2

실험은 1, 2, 3차로 나누어 연구단계별로 수행하였으며 1차 실험은 다양한 형태에 대한 전류특성이며, 2차 실험은 길이별 동작특성이다. 한편, 3차 실험은 최종적으로 동일한 형태에서 퓨즈의 전압의존성을 연구하였다.

## 2. 실험 및 고찰

### 2.1 실험회로도

사고전류 차단 및 초전도퓨즈 특성 측정을 위한 시험 장치를 그림 1에 나타내었다. 그림에서  $V_0$ 는 전원전압이며 본 실험에서는 100 ~ 400  $V_{rms}$ 까지 변화하면서 인가해 주었다. 직렬저항  $R_0$ 은 전류변화를 측정하기 위한 표준저항으로써 1  $\Omega$ 이다. SF는 박막형 초전도 퓨즈를 나타낸다. 한편  $R_L$ 은 선로에 취부되어 있는 부하를 나타내며, 정상상태에서 초전도 퓨즈가 갖는 퀘치전류를 감안하여 84  $\Omega$ 을 가해 주었다. SW1은 계통의 정상상태를, SW2는 1선 지락사고와 같은 계통 고장시험을 수행하기 위한 스위치이다. 실험 전 과정에서 SF 부분은 정상상태 운전시 초전도 상태를 유지해 주어야 하기 때문에 액체질소 속에 잠기도록 하였다.

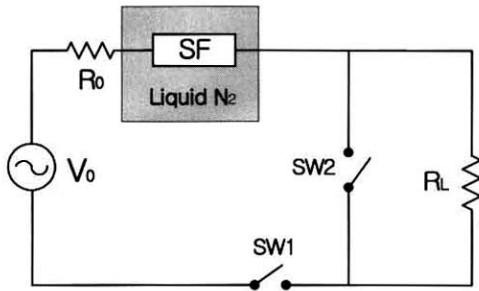


그림 1. 초전도 fuse의 실험 회로도.  
Fig. 1. Experimental circuit for a superconductive fuse.

### 2.2 실험 (1)

사고전류를 차단하기 위하여 사용된 퓨즈 소자는 독일의 THEVA사에서 제공한 직경 2 inch의 박막을 이용하였다. YBCO film은  $LaAlO_3$  기판위에 증착되었으며 두께는 300 nm이고 quench시 발생하는 hot spot에 대처하기 위하여 200 nm의 금(Au)을 in-situ로 입혔다. 시편 A는 그림 2의 확대된 부분에서와 같이 notch 2개를 두었으며, 시편 B는 rod형태, 시편 C, D, E는 길이를 서로 달리한

meander 형태로 구성하였다. 시편의 폭은 각각 1 mm이며 길이는 표 1에 나타내었다.

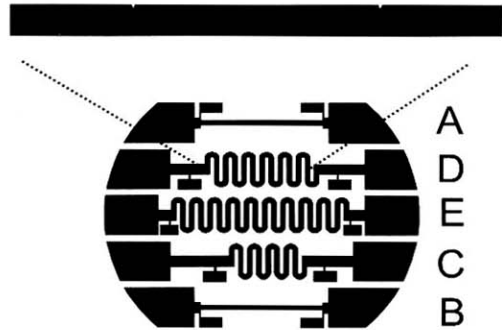


그림 2. 초전도 fuse의 패턴 모양.  
Fig. 2. Pattern shapes of superconductive fuses.

표 1. 각 초전도 퓨즈의 길이.  
Table 1. The length of each superconductive fuse.

구 분	시편A	시편B	시편C	시편D	시편E
길이(cm)	2	2	6.83	10.24	16.22

그림 3에 사고 후 각각의 형태에 대한 초전도 한류퓨즈의 전류제한 및 차단특성을 보여준다. 시편 A에서 notch는 전류제한 및 방전시간을 조절할 목적으로 만들었으나 본래의 취지는 달리, 다른 시편과 비교하여 전류제한 시간은 거의 동일하였으며 오히려 방전시간은 더욱 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 notch가 있는 부분에서 용단이 먼저 일어나고 그 부분에서 flashover를 일으켰기 때문으로 생각된다. 한편 시편 B, C, D, E에서는 0.4 msec 이내에 퀘치가 완료된 후 fuse element의 길이에 비례하여 한류전류값은 낮아지고 한류지속시간은 길어졌다. 방전특성은 시편 B, C, D가 비슷한 형태를 보였으나 시편 E는 다소 완만한 특성을 나타내었다. 이는 동일한 인가전압(200  $V_{rms}$ )하에서 상대적으로 낮은 한류 전류값에 의하여 방전에너지  $I^2R$ 값이 충분하지 않았기 때문으로 생각된다.

Fuse element의 퀘치특성을 좀더 자세히 알아보기 위하여 그림 4와 같이 단위길이당 저항특성을 살펴보았다. Fuse element의 길이가 길어질수록 단위길이당 저항값은 낮았으며 따라서 방전개시시점도 늦추어졌다. 이는 앞에서 언급한  $I^2R$ 값과

관련이 있는 것으로 생각된다. 한편 시편 A의 경우는 초기에 발생된 저항값이 약 2 msec 후에 오히려 줄어드는 것을 볼 수 있는데 notch 부분에서 flashover에 의한 전류의 통전 때문에 켄치저항값이 감소하였고, 이로 인해 방전시간이 증대하는 결과를 보여준 것으로 여겨진다.

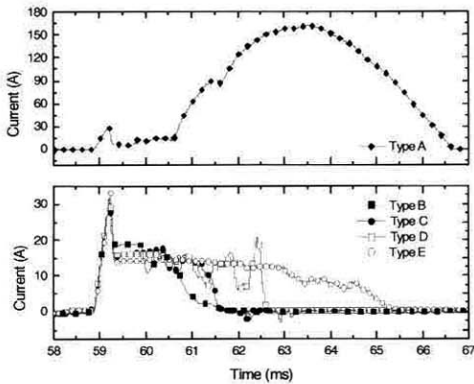


그림 3. 각 초전도 퓨즈의 한류 및 방전특성.  
 Fig. 3. Current limiting and discharge characteristics of each superconductive fuse.

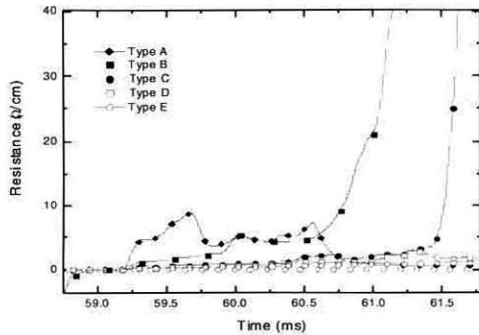


그림 4. 각 초전도 퓨즈의 단위길이당 저항특성.  
 Fig. 4. Resistance characteristics per unit length of each superconductive fuse.

그림 5는 퓨즈 실험을 수행한 이후의 각 시편의 용단특성을 보여주는 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 fuse element가 시작되는 부분(그림 a, b)과 meander line에서 곡률이 발생하는 부분(그림 c, 곡률부분에서 전계집중을 완화할 목적으로 약

10 % 가량 폭을 증대하였음)에서 용단이 발생하였다. 이는 그 부분에서 여전히 전계의 집중현상이 발생하기 때문으로 생각된다. 초전도 퓨즈의 동작 특성을 좋게 하기 위해서는 element 전역에서 용단을 발생시켜 방전에너지의 분산을 유도하여야만 한다.

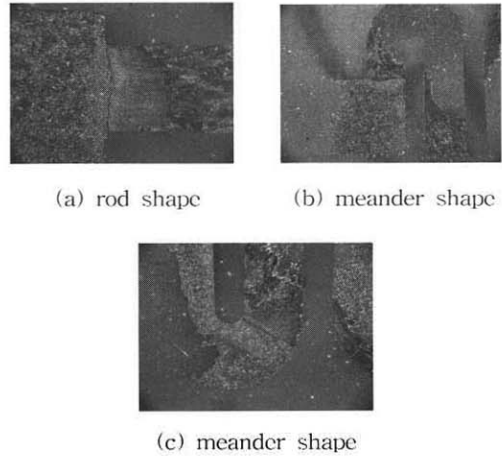


그림 5. 각 초전도 퓨즈의 용단된 부분의 사진.  
 Fig. 5. Photographs for melted parts of each superconductive fuse.

### 2.3 실험 (2)

실험 (1)의 결과를 바탕으로 형태별 특성을 살펴보기 위하여, 그림 6에서 보여주는 바와 같이 2 inch 박막을 4개의 element로 나누어서 다양한 형태로 제작하였다. 시편 A와 C는 그림에서 보는 바와 같이 내·외부에 notch 3개씩을 각각 두었으며, 시편 B는 meander형태, 시편 D는 직선형의 rod형태로 구성하였다. 시편의 폭은 A와 C는 2 mm이며 B, D는 1 mm로 하였다.

그림 7에 사고후의 각각의 형태에 대한 초전도 한류퓨즈의 전류제한 및 방전특성을 보여준다. 이때 인가전압은 100 V<sub>rms</sub>이었다. 시편 A에서는 사고 직후 notch부분에서 용단이 발생하여 일시적으로 전류가 흐르지 않다가 열이 전파하는 과정에서 다시 연결되면서 한류특성을 보이다가 방전되었다. 시편 B와 D는 한류전류값과 한류시간에서 차이를 보였으며 한류전류가 낮고 한류시간이 길수록 방전시간이 짧아짐을 확인할 수 있었다. 이는 퓨즈 element의 길이의 차이에서 비롯되는 것으로 생각

된다. 마지막으로 notch를 가진 시편 C에 400 V<sub>rms</sub>를 인가하였을 때는 사고 후 한류특성이 거의 없이 최고 약 170 A<sub>peak</sub>의 전류값을 가진 방전이 약 7 msec동안 지속되었다. 이는 퓨즈의 정격용량에 비해 너무 큰 인가전압으로 인하여 flash over에 의한 전류의 통전 때문에 방전시간이 증대하는 결과를 보여준 것으로 여겨진다.



그림 6. 초전도 fuse의 패턴 모양.

Fig. 6. Pattern shapes of superconductive fuses.

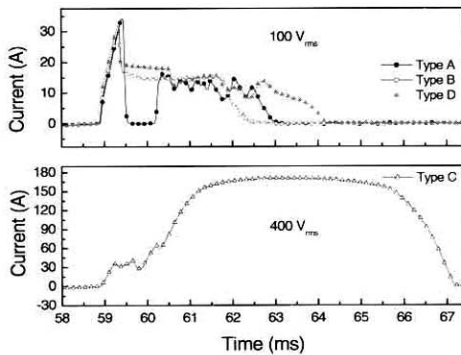


그림 7. 각 초전도 퓨즈의 한류 및 방전특성.

Fig. 7. Current limiting and discharge properties of each superconductive fuse.

2.4 실험 (3)

이번에는 퓨즈 element의 길이를 똑같도록 고정 (8.6 cm) 하고 인가전압을 달리하여 한류 및 방전 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 시편을 그림 8과 같이 설계하였다. 이때 meander 선의 곡률반경이 큰 부분에서 용단이 먼저 발생하는 문제점을 없애기 위하여 곡률반경을 똑같도록 해주었다.

그림 9는 각 시편에 인가전압을 각각 A시편에 200 V<sub>rms</sub>, B시편에 250 V<sub>rms</sub>, 그리고 C시편에 300 V<sub>rms</sub>를 가해준 이후의 한류 및 방전특성을 보여준다. 전체적으로 전압이 높을수록 한류 및 방전특성이 양호해 짐을 알 수 있다. 즉, flash over에 의한 방전이 시작되는 전압 이하에서는 hot spot에 의한 국부적인 시편의 용단이 전압이 상승할수록 더 용

이하기 때문에 오히려 한류 및 방전특성이 더 좋아지는 것으로 생각된다. 각 시편에서 한류전류값의 차이는 켄치 이후 퓨즈 element에서 발생한 열이 인가전압에 따라 증가하였기 때문으로 생각된다.

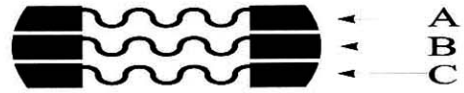


그림 8. 초전도 퓨즈의 패턴 모양.

Fig. 8. Pattern shapes of superconductive fuses.

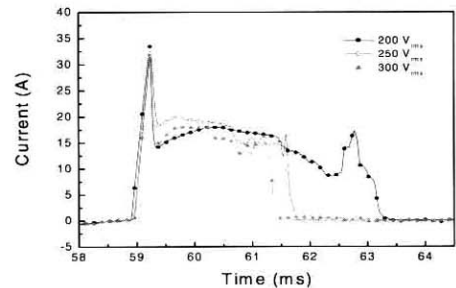
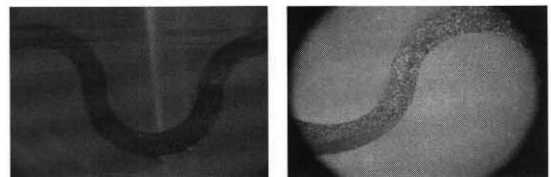


그림 9. 인가전압에 따른 각 초전도 퓨즈의 특성.

Fig. 9. The characteristics according to applied voltages of each superconductive fuse.



(a) 200 V<sub>rms</sub>

(b) 250 V<sub>rms</sub>



(c) 300 V<sub>rms</sub>

그림 10. 전압별 초전도퓨즈의 용단된 부분의 사진.

Fig. 10. The photographs for melted parts of superconductive fuses according to applied voltages.

그림 10은 그림 9의 결과를 좀더 자세히 살펴보기 위하여 광학현미경을 이용하여 fuse element의 용단특성을 관찰한 사진이다. 200 V<sub>rms</sub>의 인가전압 하에서는 용단이 전역에서 고루 발생하였으나, 인가전압이 250, 300 V<sub>rms</sub>로 증가하면서 국부적인 용단으로 진행하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 낮은 전압(200V<sub>rms</sub>)에서는 국부적인 켄치에 의한 열 발생이 서서히 전역으로 전파되었기 때문에 한류 및 방전시간이 길었으나, 인가전압이 증가(250, 300 V<sub>rms</sub>)하면서, 소비에너지 I<sup>2</sup>R의 증가 때문에 발생된 열이 충분히 전파되지 못하고 국부적으로 용단됨으로써 한류 및 방전시간을 줄였기 때문으로 생각된다.

### 3. 결론

이상에서 초전도 박막을 이용한 한류 퓨즈의 기초특성을 고찰하였다. 초전도 퓨즈는 사고직후 0.4 msec 이내에 켄치가 완료된 후 최소 0.5 msec 이상 동안 한류 동작을 수행하다가 방전되었다. 방전 지속시간은 2.5 msec 이내 이었으며 자체 차단기능을 수행할 수 있을 정도로 충분히 짧았다. 이는 fuse element의 크기가 작기 때문으로 생각된다. 인가전압 100 V<sub>rms</sub>에서는 fuse element의 길이에 의하여 한류전류값과 한류시간이 결정되었으며 한류전류가 낮고 한류시간이 길수록 방전시간은 짧아졌다. 한편 과도한 전압(400 V<sub>rms</sub>)에서는 용단된 부분에서 flash over에 의하여 전류의 통전이 발생하였고 이로 인해 방전이 7 msec 동안 지속되었다. Fuse element의 길이를 일정(8.6 cm)하게 한 경우, 전압이 높아질수록 한류 및 방전특성이 양호하게 나타났으며 이는 fuse element의 소비에너지 I<sup>2</sup>R과 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉, 인가 전압이 증가함에 따라 국부적으로 발생된 hot spot이 급증을 따라 전파되기 이전에 높은 소비에너지 I<sup>2</sup>R에 의하여 용단이 발생하였기 때문이다. 전체적으로 초전도 퓨즈는 초전도체의 고전류밀도 특성을 이용한 기기이기 때문에 일반 퓨즈에 비하여 크기가 작고 간단한 구조로 설계할 수가 있었다. 또한, 냉매로 액체질소를 사용하기 때문에 방전시 유해가스가 발생하지 않아 환경친화적인 특성도 부가적으로 가지고 있었다. 한편, 초전도 퓨즈에 대한 연구는 국내외적으로 연구성과가 아직 미미한 실정이다. 이런 관점에서 이번 연구결과는 그 나름의 의미를 부여할 수 있지만 아직 시작단계에 불과하다. 따라

서, 향후 fuse element에 적절한 notch의 삽입을 통하여 국부적인 용단을 촉진함으로써 한류 및 방전특성을 높이는 연구 등이 이어져야 할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

“이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.” (KRF-2003-003-D00132)

### 참고 문헌

- [1] N. Shimomura, M. Nagata, C. Grabowski, K. Murayama, and H. Akiyama, “Effects of wire shape on unstable behavior of parallel fuses”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 24, No. 3, p. 1192, 1996.
- [2] N. Shimomura, H. Akiyama, and S. Maeda, “Compact pulsed power generator by an inductive energy storage system with two-staged opening switches”, IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 19, No. 6, p. 1220, 1991.
- [3] Hyo-Sang Choi, “Operating properties of resistive superconducting fault current limiters with various pattern shapes”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 12S호, p. 1286, 2003.
- [4] 최효상, 황시돌, 현옥배, “1선 지락사고에 대한 배전급 저항형 초전도 한류기의 전류제한 특성”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 6호, p. 505, 2001.
- [5] 최효상, 현옥배, 김혜림, 황시돌, “15 kVA급 박막형 초전도 전류제한기의 한류 특성”, 전기전자재료학회논문지, 13권, 12호, p. 1058, 2000.