

## YBCO coated conductors(CCs)의 안정화재 두께 변화에 따른 quench/recovery 특성 분석에 관한 연구

### Quench/recovery test results of the YBCO coated conductors(CCs) having various stabilizer thicknesses

권나영<sup>1</sup>, 김현성<sup>1</sup>, 김광록<sup>1</sup>, 김경준<sup>1</sup>, 임성우<sup>3</sup>, 김혜림<sup>3</sup>, 현옥배<sup>3</sup>, 이해근<sup>2,\*</sup>

N. Y. Kwon<sup>1</sup>, H. S. Kim<sup>1</sup>, K. L. Kim<sup>1</sup>, K. J. Kim<sup>1</sup>, S. W. Yim<sup>3</sup>, H.-R. Kim<sup>3</sup>, O.-B. Hyun<sup>3</sup>, H. G. Lee<sup>2,\*</sup>

**Abstract:** Since a stabilizer of YBCO coated conductor (CC) plays a very important role of bypassing over-current and transferring heat generated in the moment of fault, it is one of big issues to determine the material of the stabilizer and its dimension for the high performance of the HTS power application system. Especially, in the case of a superconducting fault current limiter (SFCL), which requires it to react immediately to the occurrence of fault, characteristics of stabilizer are decisive in limiting fault current and recovering superconducting properties during and after quenching. In this paper, the quench / recovery characteristics of YBCO CCs with various thickness of stabilizer were analyzed. The quench/recovery test carried out at 20  $V_{rms}$ , 5 cycles (60 Hz) and results showed that as the thickness of the stabilizer decreased, both the final approach temperature and the recovery time decreased.

**Key Words:** YBCO coated conductor (CC), Stabilizer thickness, Superconducting fault current limiter (SFCL), Quench/recovery characteristics.

### 1. 서 론

한류기는 전력 수요가 많아지므로 인해 발생하는 예견치 못한 고장 전류를 효과적으로 제한하여 전력시스템을 보호하는 전력기기이다. 여러 종류의 한류기 중, 저항형 초전도 한류기는 quench 시 초전도체가 상전이에 의한 저항 발생을 이용하여 고장전류를 단시간 내에 자동적으로 제한해 주는 방식을 이용하고 있다. 초전도 한류기에 사용되기 위한 한류소자는 상전이 속도가 빠르고 임계전류밀도가 높고 균일하며, 교류손실

이 작아야 하는 조건이 요구된다[1,2]. 2세대 고온초전도인 YBCO coated conductor (CC)는 1세대 고온초전도와 비교하여 높은 index number(n)값 및 높은 임계전류밀도 값을 갖고 있으며 안정화재 (stabilizer) 재료를 다양하게 선택 할 수 있는 장점을 갖고 있어서 현재 YBCO CC를 한류소자로 이용한 저항형 초전도 한류기 연구가 활발히 진행되고 있다[3-7].

일반적으로 YBCO CC의 안정화재는 quench 시 발생하는 고장 전류의 우회와 열 발생을 완화 시켜주는 역할을 하고 있기 때문에 안정화재의 적절한 재료 선택과 두께의 최적화 확립은 저항형 초전도 한류기의 성능을 결정짓는 중요한 설계요소가 된다. 따라서 본 연구에서는 사고 시 안정화재 두께에 따른 YBCO CC의 최종도달 온도변화 및 회복특성 변화를 조사하기 위하여 화학적 etching 방법을 이용하여 초전도층의 특성 저하 없이 안정화재의 두께를 조절하고 quench / recovery test를 실시하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1. Sample 준비

본 실험에서는 저항형 초전도 한류소자로 안정화재의 재료가 비저항이 높은 stainless steel로 구성되어 있는 AMSC사의 344S CC를 선택하였으며, 20 cm 길이의 3개 선재를 1세트로 구성하였다. 안정화재의 두께 조절 방법으로 초전도층을 손상시키지 않는 화학적인 etching 방법을 선택하였으며, 균일한 표면과 일정한 두께를 얻기 위하여 Nickel Etchant Type I (Transene Co.)에 증류수를 적절한 비율로 섞어 희석시킨 후 사용하였다[8,9]. Fig. 1은 etching공정을 간단히 나타낸 사진이다.

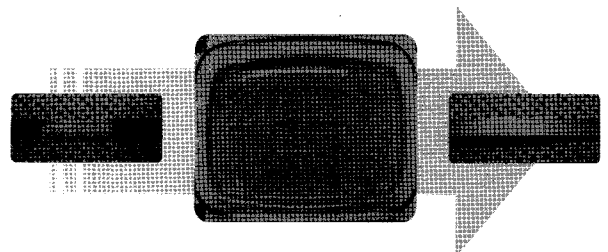


Fig. 1. Photographs of the etching process using the chemical etching method.

<sup>1</sup>학생회원 : 고려대학교 신소재공학과

<sup>2</sup>정 회 원 : 고려대학교 신소재공학과

<sup>3</sup>정 회 원 : 한전전력연구원 송배전연구소

\*교신저자 : haigunlee@korea.ac.kr

원고접수 : 2009년 08월 04일

심사완료 : 2009년 08월 20일

게재확정 : 2009년 08월 24일

Fig. 2는 본 실험에 사용한 etching된 YBCO CC를 sample 홀더에 장착한 사진이다. 장선재를 균일하게 etching 하는데 어려움이 있어 20 cm의 길이로 선재 3개를 etching 한 후 전체 60 cm 길이로 직렬연결 하였으며, 각각의 선재 (Elements A, B, C)에도 10 cm 간격으로 전압탭을 부착하여 각 선재에 quench 특성을 확인할 수 있도록 하였다. 또한 quench / recovery test에 앞서 화학적 etching 방법이 초전도층의 특성 저하에 영향을 주는 것을 확인하기 위하여 1  $\mu\text{W}/\text{cm}$ 를 기준으로 각각의 sample의 임계전류 측정하였다.

### 2.2. Quench / Recovery test 구성

Quench test 시 안정화재의 다양한 두께에 따른 최종도달 온도를 추정하기 위한 온도-저항 곡선을 얻기 위해 4단자법을 이용하여 300 K 부터 60 K 까지 냉각시켜주면서 저항을 측정하였다. Fig. 3은 YBCO C C의 온도에 따른 저항을 측정하기 위한 실험 장치와 sample을 부착한 모습을 나타낸 사진이다.

Quench / recovery 특성을 조사하기 위해 Fig. 4와 같은 사고 모의 회로를 구성하였다. 이 회로는 정상 시에는 스위치 1만 닫아 폐회로를 형성하였고, 사고를 모의하기 위해 5주기 동안 스위치 2를 닫아 한류소자에 사고전류를 인가 한 뒤, 스위치 1을 열어 줌으로써 한류소자가 불필요하게 과전류에 노출되지 않도록 하였다[10]. Quench test의 인가전압은 교류 20  $V_{rms}$ , 5 주기 (60 Hz)에 고정하였고, 회로의 스위치가 SCR (Silicon- Controlled Rectifier)로 구성되어 있어 off 상태에서도 미세전류가 흐르는 것을 이용하여 quench 후 회복 신호를 측정하였다.



Fig. 2. Photograph of the sample set-up.

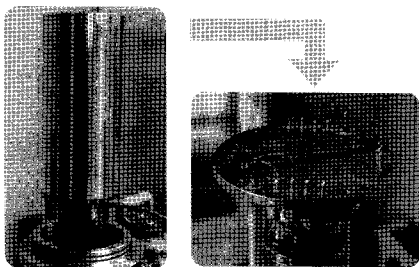


Fig. 3. Photographs of the experimental set-up for the resistance measurement.

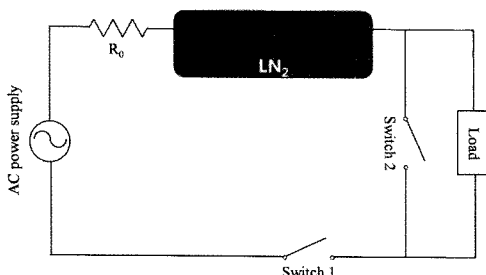


Fig. 4. Schematic drawings of the circuit for the quench / recovery test.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 안정화재의 다양한 두께에 대한 연구

Table 1은 etching 시간에 따른 안정화재의 두께 변화를 정리하여 나타낸 것이다. 안정화재의 두께는 상부 층과 하부 층의 두께를 모두 합한 것이며 sample 1, 2, 3, 4는 각각 54, 44, 34, 18  $\mu\text{m}$ 로 etching 시간 10분이 넘어가면 etching rate가 급격히 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 4는 각각의 sample의 단면 이미지를 광학현미경 (Optical Micrograph)으로 관찰한 것으로 안정화재의 표면이 상당히 균일하게 etching 되었음을 알 수 있으며, 상부 및 하부의 안정화재 층의 두께 역시 거의 일정하게 etching 된 것을 알 수 있다.

Fig. 5의 V-I 그래프에서 sample 1 (virgin sample)의 임계전류와 비교해 볼 때 sample 2와 4에서 최대 5%의 임계전류 감소를 볼 수 있었으나, 이는 선재 제작 후 구간 별 임계전류 실험 시 측정된 임계전류 값의 오차 범위에 들어가므로 초전도층의 전기적 특성의 큰 저하는 없다고 볼 수 있다. 그러므로 안정화재의 다양한 두께 조절을 위한 방법으로 화학적인 etching을 이용하는 것이 최적의 방법이라 판단된다.

Table 1. Variation of the stabilizer thickness with etching time.

Sample number	Etching time [min]	Stabilizer thickness [ $\mu\text{m}$ ]
1	0	54
2	5	44
3	10	34
4	15	18

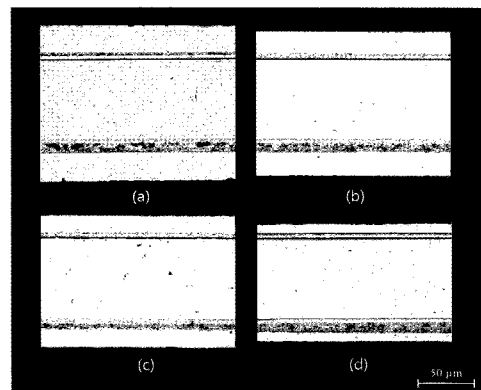


Fig. 4. Optical micrographs of transverse cross section of (a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

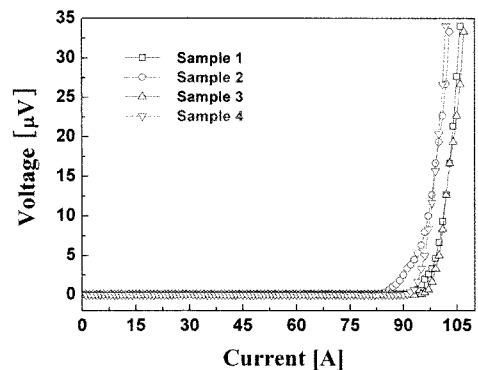


Fig. 5. V-I curves of test samples.

3.2. 안정화재의 다양한 두께에 따른 quench 특성

Fig. 6은 각각의 소자의 한류 특성을 나타낸 그래프이다.  $V_{a+b+c}$ 는 선재길이 총 60 cm에서 발생한 전압을 나타내는 것이며,  $V_A, V_B, V_C$ 는 20 cm의 선재 각각의 전압을 나타낸다. Sample 1-4 모두 초기부터 사고전류가 제한됨을 알 수 있으며,  $V_A, V_B, V_C$  각각의 그래프들이 거의 일치하는 것으로 보아 거의 동시에 quench 되었음을 알 수 있다. 이는 직렬로 연결한 3개 선재의 안정화재 두께가 거의 비슷하게 etching 되었다는 것을 간접적으로 보여주는 결과라고 할 수 있다.

Fig. 7은 각 sample의 온도별 저항을 나타낸 것으로 안정화재의 두께가 줄어들수록 저항이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 각각의 sample의 온도 상승 변화를 나타낸 그래프로 sample 1, 2, 3, 4의 저항은 각각 3.3, 3.5, 3.6, 3.5 m $\Omega$ /cm 이다. 또한 온도-저항 그래프 (Fig. 7)를 사용하여 sample의 최종도달온도를 환산한 결과 각각 288, 270, 256, 237 K으로 나타났으며, 이 결과는 안정화재의 두께가 얇아질수록 한류소자의 최종도달 온도는 낮아진다는 것을 보여준다.

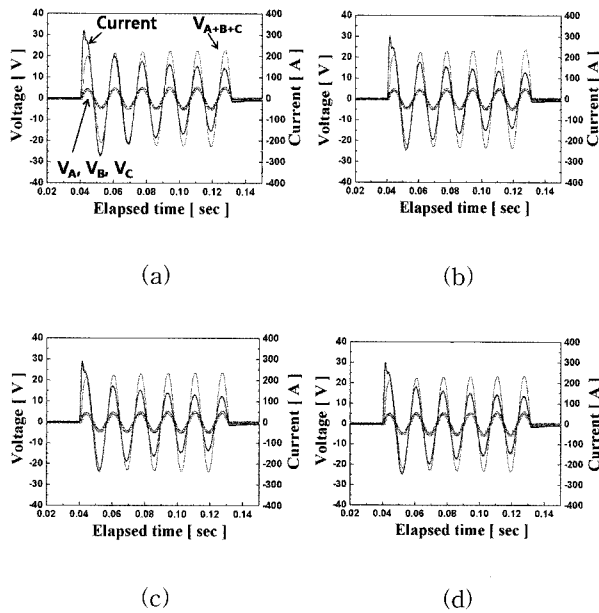


Fig. 6. Quench test results of (a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

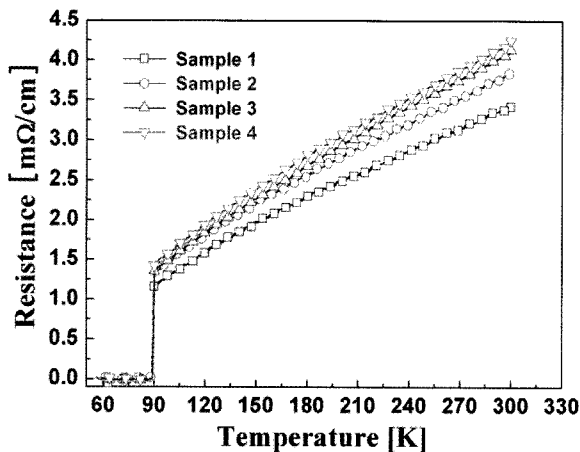


Fig. 7. R-T curves of test samples.

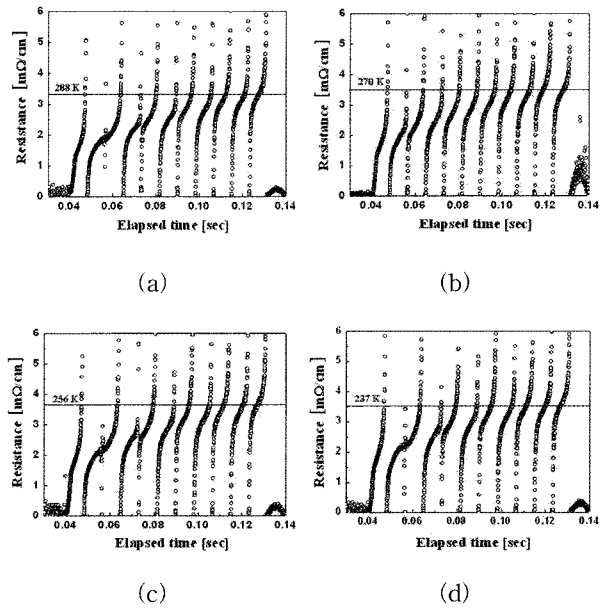


Fig. 8. Final approach temperatures of (a) sample 1, (b) sample 2, (c) sample 3, and (d) sample 4.

3.3. 안정화재의 다양한 두께에 따른 회복 특성

Fig. 9는 안정화재의 두께에 따른 회복시간을 나타낸 그래프로, sample 1, 2, 3, 4는 각각 2.4, 1.3, 1.2, 1.0 초의 회복시간을 갖는 것을 알 수 있으며, 이는 안정화재의 두께가 얇아질수록 회복시간이 짧아진다는 것을 말한다. 이 결과는 선재에서 발생하는 최종도달 온도와도 밀접한 관련이 있는데, 사고모드 시 한류소자가 quench 되어 발생하는 줄열이 액체질소로 열전달될 때 안정화재의 두께에 많은 영향을 받는다는 것을 의미한다. 결론하면, 안정화재의 두께가 얇아질수록 선재에서 발생하는 줄열이 액체질소와 효과적으로 열교환 되어 최종도달 온도를 낮추게 되고 이에 따른 회복시간도 빠르게 된다는 것이다. 그러므로 안정화재의 두께가 얇은 선재를 한류소자로 적용하면 액체질소 냉각시스템을 적용한 저항형 한류기의 성능을 향상시키는데 많은 기여를 할 수 있다고 판단된다.

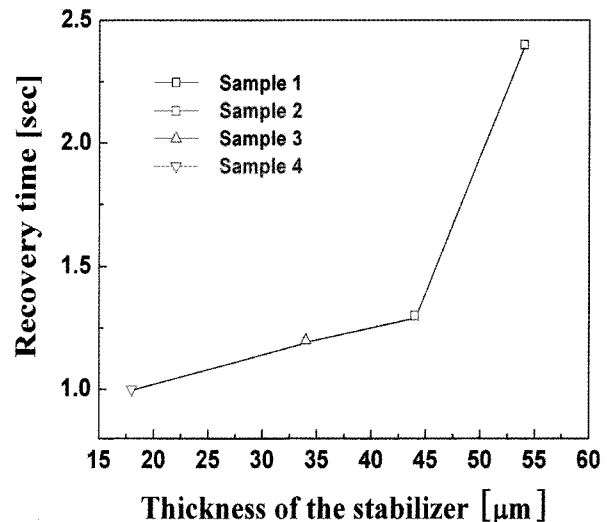


Fig. 9. Recovery time versus stabilizer thickness.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 화학적인 etching 방법을 사용하여 초전도체의 특성 저하 없이 YBCO CC의 안정화재의 두께를 조절하는 방법을 소개하였으며, etching 된 선재의 임계전류 값을 측정하여 이를 증명하였다. 또한 quench / recovery test를 교류 20  $V_{rms}$ , 5주기 (60 Hz)에서 수행하여 안정화재의 두께가 얇아질수록 최종 도달 온도와 회복시간이 감소함을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 한류소자의 quench / recovery 특성을 조사함으로써 한류소자 설계 시 저항형 초전도 한류기의 성능을 향상시키기 위해 안정화재 두께가 얇은 YBCO CC를 선택함이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단과 전력산업연구개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 또한 산업자원부 전력기반조성사업센터의 고급인력양성사업을 통한 연세대학교 계통적용 신 전력기기 연구센터의 부분적인 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] O. B. Hyun, H. R. Kim, Y. S. Yim, J. Sim, K. B. Park and I. S. Oh, "Domestic Effects for SFCL Application and Hybrid SFCL", 한국 초전도학회, Vol. 10 No. 1, pp. 60-67, 2008.
- [2] 안민철, 석복렬, 고태국, "초전도한류기에 적용하는 YBCO 박막형 선재의 반복적 과전류 특성", 한국 초전도·저온공학회논문지, 9권 3호, pp. 26-31, 2007.
- [3] D. K. Park, M. C. Ahn, S. E. Yang, Y. S. Yoon, B. Y. Seok, C. Lee, H. M. Chang and T. K. Ko, "Development of 220V/300A class non-inductive winding type fault current limiter using 2G HTS wire," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 17, No. 2, pp. 1855-1858, 2007.
- [4] M. C. Ahn, D. K. Bae, S. E. Yang, D. K. Park, T. K. Ko, C. Lee, B. Y. Seok and H. M. Chang "Manufacture and test of small-scale superconducting fault current limiter by using the bifilar winding of coated conductor," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, pp. 646-649, 2006.
- [5] 나진배, 안민철, 김민재, 김영재, 양성은, 박동근, 김호민, 석복렬, 고태국 "스테인리스 스틸 안정화재를 가진 coated conductor의 적층 유무에 따른 효과적인 사고전류 제한을 위한 연구", 한국초전도·저온 공학회논문지, 9권 1호, pp. 9-13, 2007.
- [6] 김혜림, 이승엽, 차상도, 최효상, 현옥배 "선트박막 두께에 따른 박막형 초전도 한류소자의 켈치특성", 한국초전도·저온공학회논문지, pp. 51-54, 2003.
- [7] 심정욱, 현옥배, 박권배, 임성우, 김혜림, 이방욱, 오일성 "전력용 반도체 소자를 적용한 하이브리드 초전도 한류기 동작 신뢰도 향상", 한국초전도·저온

공학회논문지, 9권 3호, pp. 57-61, 2007.

- [8] H. S. Kim, N. Y. Kwon, K. S. Chang, T. K. Ko, H. M. Kim, W. S. Kim, C. Park and H. G. Lee "Joint Characteristics of the YBCO Coated Conductor (CC) by Chemical Etching," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 2835-2838, 2009.
- [9] N. Y. Kwon, H. S. Kim, K. L. Kim, S. W. Yim, H. R. Kim, O. B. Hyun, H. M. Kim and H. G. Lee "Influence of stabilizer thickness on over-current test of YBCO-coated conductors," Superconductor Science and Technology, 22, pp. 045003, 2009.
- [10] 김혜림, 최효상, 임혜용, 김인선, 현옥배 "Au/YBCO 박막 meander line의 켈치회복에 대한 분석", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp. 92-94, 2001.

#### 저 자 소 개



**권나영(權羅瑩)**  
1982년 4월 21일생, 2007년 서울산업대 공대 신소재공학과 졸업, 현재 고려대 대학원 신소재공학과 석사과정.



**김현성(金炫成)**  
1982년 12월 20일생, 2007년 고려대공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.



**김광록(金橫祿)**  
1982년 8월 18일생, 2008년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.



**김경준(金景準)**  
1983년 9월 8일생, 2008년 고려대 공대 신소재공학부 졸업, 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정.



**임성우(任星禹)**  
1973년 2월 28일생, 1997년 전북대학교 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 선임연구원.



**김혜림(金蕙林)**  
1957년 3월 15일생, 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전전력연구원 책임연구원.



현옥배(玄鉦培)

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 수석연구원.



이해근(李海根)

1963년 9월 26일생, 1987년 고려대 공대 재료공학과 졸업, 1990년 미 일리노이대 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 1995~1997년 MIT, FBML, 박사 후과정, 1997~2006년 MIT, FBML, 연구교수, 2006~현재 고려대학교 신소재공학부 부교수.