

### 분할형 YBCO CC의 전기적 특성

변상범\*, 양귀상\*, 박상호\*, 최석진\*, 김병주\*, 김우석\*\*, 이지광\*\*\*, 박찬\*\*, 최경달\*  
한국산업기술대\*, 서울대\*\*, 우석대\*\*\*

### Electrical Characteristics of Striated YBCO Coated Conductors

Sang Beom Byun\*, kwy Sang Yang\*, Sang Ho Park\*, Suk jin Choi\*, Kim Byeong-Joo\* Woo-Seok Kim\*\*,  
Ji-Kwang Lee\*\*\*, Chan Park\*\*, Kyeongdal Choi\*  
Korea Polytechnic University\*, Seoul National University\*\*, Woosuk University\*\*\*

**Abstract** - 2세대 고온초전도 선재는 전기적, 기계적 특성이 1세대 고온초전도 선재보다 더 우수하지만, 1세대 고온초전도 선재보다 더 높은 교류손실 밀도를 발생시킨다는 단점이 있다. 본 논문에서는 2세대 초전도 선재인 박막형 YBCO CC(Coated Conductor)에서 발생하는 교류 손실을 감소하기 위한 방법으로 선재의 초전도층을 분할하여 단면의 중형비를 줄이는 방법을 제안하였으며, 실제로 제작 및 특성 측정을 통해 제안된 방법의 타당성을 보였다. 박막형 선재의 초전도층을 분할하기 위해 포토마스크를 이용한 에칭 방법을 이용하였다. 샘플의 제작을 위해 안정화층이 없는 폭 12mm의 YBCO CC를 사용하여 샘플의 길이는 15cm로 하고 선재의 분할수를 다르게 하여 각 샘플에 대한 자화 손실과 각 소선의 임계전류를 측정한 후 선재의 전기적 특성 변화를 알아보았다.

#### 1. 서 론

최근 도심지역에 전기에너지 소비량이 급증하면서 전력기기 용량의 한계에 다다르고 있으며, 이를 위해 대용량 고효율 전력기기에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 초전도 전력기기는 용량 증가의 한계를 보이고 있는 기존 전력기기를 대체할 수 있는 유력한 후보이며, 최근 2세대 고온초전도 선재 제작기술의 비약적인 발전에 힘입어 고온초전도체를 이용한 전력기기의 개발에 관한 많은 연구가 국내외에서 이루어지고 있는 실정이다[1~3]. 현재 개발 되고 있는 2세대 고온초전도 선재인 YBCO CC는 기존에 사용되던 1세대 고온초전도 선재인 BSCCO 선재와 다르게 박막형태로 제작되고 있다. 이렇게 제작된 YBCO CC는 BSCCO 선재 보다 10배가 넘는 임계전류 밀도를 가지고 있고, 외부 자장에 의한 임계전류 밀도의 저감 효과도 1/5 이하이기 때문에 1세대 고온초전도 선재를 대체할 가능성이 높을 것으로 예상된다. 그러나 교류 전력기기와 같이 높은 교류자장이 인가되는 경우 초전도체의 반자기적 특성으로 인해 자화손실이 발생하게 되고, YBCO CC의 경우 선재의 넓은 면에 수직으로 자장이 인가되면 1세대 고온초전도 선재보다도 더 큰 자화 손실밀도가 발생할 가능성이 높다. 현재 상용화 되고 있는 YBCO CC 역시 교류자장에 의해 발생하는 높은 자화손실 때문에 전력기기의 응용에는 많은 문제점을 가지고 있는 상황이다.

본 논문에서는 2세대 고온초전도 선재의 자화손실의 크기를 줄이기 위해, 박막 형태인 선재의 초전도층을 분할하여 단면의 중형비를 줄이는 방법을 선택하였다. 선재 분할을 위해 레이저나 다이아몬드 커팅과 같은 방법들을 사용할 수도 있지만, 레이저를 사용할 경우 열에 의해 선재의 손상이 우려되고, 다이아몬드 커팅을 사용하는 경우에는 정밀가공이 어려울뿐더러 가공 시 진동에 의한 초전도 특성의 열화가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 화학적인 방법인 포토 마스크를 이용한 에칭 방법을 제안하였다. 포토 마스크의 제작 방법에는 포지티브 타입과 네가티브 두 가지 타입이 있으며, 제작된 필름에 빛을 투과 했을 때 햇빛을 받은 부분이 현상되면 포지티브 타입이고, 반대로 햇빛을 받지 않은 부분이 현상되면, 네가티브 타입이라고 한다. 본 연구에서는 논문은 네가티브 타입 포토 마스크를 이용한 에칭을 사용하여 안정화 층이 없는 YBCO CC의 초전도층의 분할 작업을 한 후에 각 소선에 흐르는 전류와 선재의 자화손실을 측정하여 전기적인 특성의 변화를 확인하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 YBCO CC 선재 제원

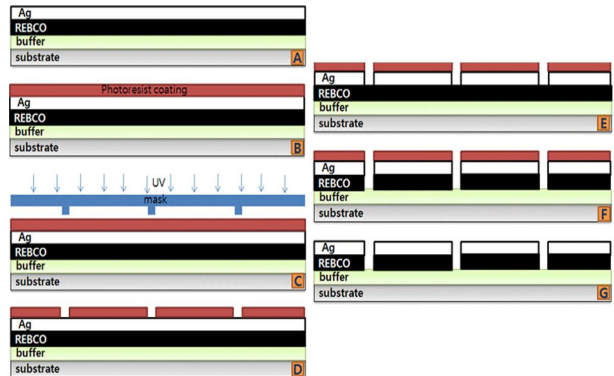
본 실험에 포토 마스크를 이용한 에칭 작업을 통해 제작된 샘플에 사용된 선재는 안정화 층이 없는 YBCO CC이며, 선재의 제원을 표 1에 나타내었다. 이 YBCO CC 선재는 초전도층 위에 2 $\mu$ m의 얇은 은층이 있으며 추가적인 안정화층이 없으므로 임계전류를 초과 하는 전류를 흘려주면, 선재가 손상되는 현상을 보인다.

<표 1> YBCO CC의 제원

사 양	값
임계전류 ( $I_c$ )	290 A ( 77K, 자기자장)
선 재 폭	12 mm
선 재 두께	0.5 mm
초전도 층 두께	1 $\mu$ m

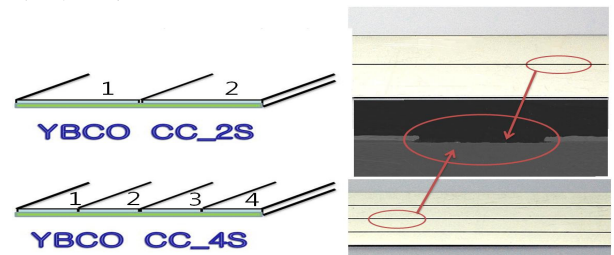
##### 2.2 포토 마스크를 이용한 에칭 제작 방법

포토마스크는 석영 기판 위에 반도체나 LCD의 미세 회로를 형성화한 것으로 노광 시스템을 이용하여 회로를 웨이퍼나 유리 기판에 새기는 사진 원판 필름에 해당되며, 마치 증명사진의 필름을 갖고서 똑같은 사진을 여러 장 얻어내듯이 샘플 및 양산화 작업을 하는데 반드시 유용하게 사용된다. 필름 포토 마스크를 이용한 에칭 과정은 그림 1과 같다.



<그림 1> 필름 포토 마스크를 사용한 선재의 에칭 과정

먼저 선재를 준비하고(그림 1-A) 감광필름을 55~65°C에서 20초 정도 적층하였다.(그림 1-B) 패턴이 그려진 마스크를 대고 380nm UV 램프에 10초 동안 노출하면 감광필름이 경화되고(그림 1-C), 다음 과정으로 스프레이로 1% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용액을 뿌려주면 경화 되지 않은 감광필름 쪽이 현상되어 필요한 패턴을 얻을 수 있다.(그림 1-D). YBCO CC 선재의 안정화 층 역할을 하는 은 부분을 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 와 KCN으로 2:1 부피비로 혼합한 용액으로 에칭하여 (그림 1-E) 에틸알코올로 수세하였고, YBCO 층은 10% HCl 용액을 사용하여 에칭한 후에 알코올로 수세 하였다(그림 1-F).이렇게 현상이 완료된 YBCO CC 선재는 아세톤으로 감광필름을 박리한다. (그림 1-G)

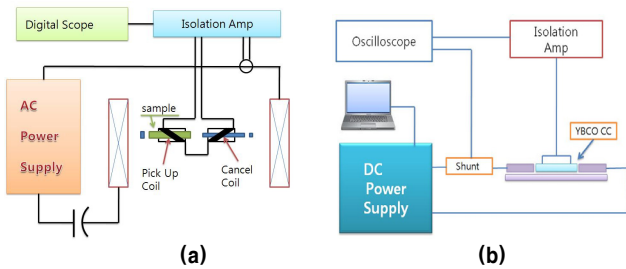


<그림 2> 포토 마스크로 제작된 YBCO CC 선재

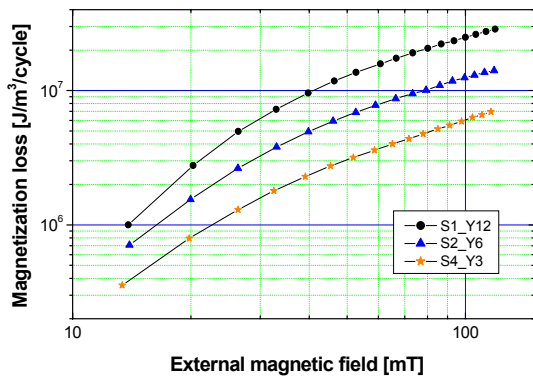
그림 2는 필름 포토 마스크로 에칭한 선재의 단층과 선재를 보여주고 있다. 이는 선재의 초전도 층이 분리 되어 있기 때문에 6mm 선재 2가닥과 3mm 선재 4가닥의 선재를 평행하게 놓은 형태가 된다. 이렇게 제작된 샘플의 각 소선의 임계전류가 동일한지, 자화손실의 값이 감소하는지 실험을 통해 확인하였다.

### 2.3 전기적 특성 측정 결과

제작된 샘플의 자화 손실을 위한 실험 개략도는 그림 3의 (a)이고, 임계전류 측정을 위한 실험 개략도는 그림 3의 (b)이다. 자화 손실 측정을 위해 제작된 픽업 코일과 캔슬코일의 턴 수는 850턴이며, 코일의 두께는 30 $\mu$ m이다. 외부에서 자장을 가해주는 마그넷은 2mm 지름의 구리도선을 사용하여 제작하였으며, 턴 수는 1500턴, 인덕턴스는 약 0.554H이다. 그림 (a)의 임계전류를 측정을 위한 직류 전류원에서 인가할 수 있는 최대 전류는 240A이며, 션트 저항을 사용하여 선재에 흐르는 전류 값을 확인하였다. 션트 저항의 용량은 300A/50mV 이다. 단일(폭 12mm, S1\_Y12), 2분할(폭 6mm 2개, S2\_Y6), 4분할(폭 3mm 4개, S4\_Y3) 선재에 대한 자화 손실을 측정된 결과는 그림 4에 나타나 있다. 그래프를 통해 선재의 분할로 인해 자화 손실이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

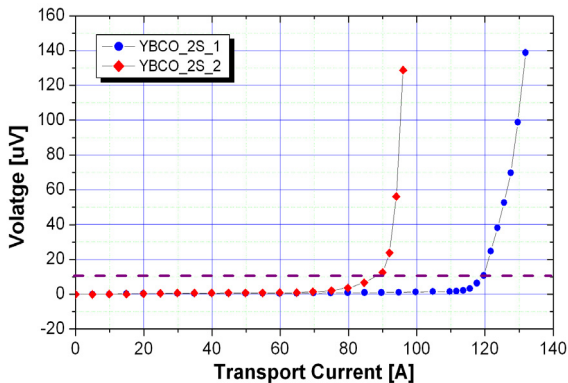


〈그림 3〉 자화손실 및 임계전류 특성 실험을 위한 개략도

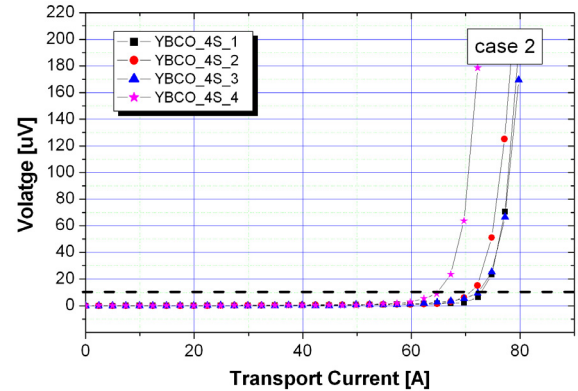
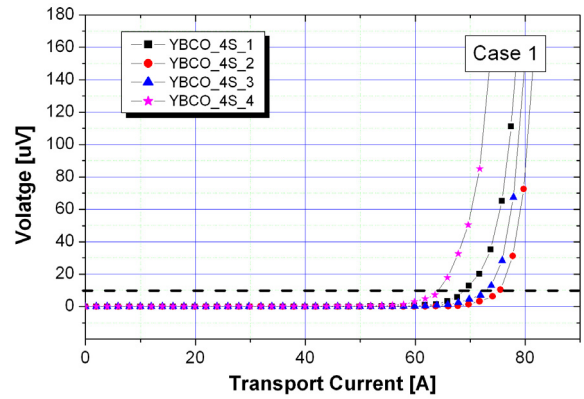


〈그림 4〉 YBCO\_2S의 임계 전류 측정 결과

실험에 사용된 YBCO CC는 안정화 층이 불안하여 전류를 인가할 때 소선되는 현상이 반복 되어, 이 문제점을 해결하기 위해 펄스파형으로 전류를 인가하였다. 측정된 결과 다음 각각 그림과 같다. 초전도 선재의 전체 임계전류가 290A 일 때 2분할 선재의 각 소선의 임계전류는 145A, 4분할 선재의 임계전류는 72A으로 예상된다. 분할된 소선의 순서는 그림 2에 나타나 있으며, 측정결과는 다음과 같다.



〈그림 5〉 YBCO CC의 자화손실 측정 결과



〈그림 6〉 YBCO\_4S의 임계 전류 측정 결과

그림 5는 그림 2의 2분할 샘플의 각 필라멘트에 1초에 5A 씩 증가시키면서 측정된 임계전류이다, 그림 6은 4분할 선재의 각 필라멘트에 1초에 2A 씩 증가시키면서 측정된 임계전류 측정결과로서 동일한 방법으로 제작된 2개의 샘플에 대해 실험하였으며, case 1, case 2로 표시 하였다. 2분할 선재의 임계전류 측정결과 예상 값과 차이를 많이 보이는데, 이는 샘플 제작 중 선재의 손상 때문인 것으로 예상되며, 4분할 선재의 임계전류 측정값은 예상 값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문은 YBCO CC를 실용화할 때 가장 문제가 되는 자화 손실을 감소하기 위해 선재를 분할하는 것을 제안하였고, 네가티브 타입의 포토 마스크를 이용한 에칭 방법을 사용하여 선재를 분할하였다. 자화 손실을 측정 해본 결과 분할 수가 증가하면 자화 손실이 감소하고, 4분할 한 선재에서 각 소선의 임계전류를 측정된 결과 특정한 부분에서 임계전류가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 임계전류를 합한 값은 287A, 283A로 10A 이내의 임계전류가 감소하지만, 전기적인 특성의 변화가 없는 것과 동일한 패턴을 얻을 수 있는 것을 확인 하였다. 2가닥 소선에서 발생한 오차는 앞으로 동일한 샘플을 여러 개 제작하고, 선재의 분할 수를 늘려서 자화 손실과 각 소선에 대한 임계전류를 측정하여 본 논문에 네가티브 타입의 포토 마스크를 이용한 에칭 방법의 타당성을 증명하도록 하겠다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용 기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

[1] K.Funaki, et al., "Development of a 22kV/6.9kV Single-Phase Model for a 3MVA HTS Power," Transformer, IEEE Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp.1578-1581, March, 2001.  
 [2] 박찬배의 5인, "1MVA 고온초전도 변압기 개념설계 및 3차원 전자장 해석," 대한전기학회 논문지, 제 52권, 제1호, pp. 23-26, 2003  
 [3] B. W. McConnell, "Transformers a Successful Application of High Temperature Superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, Issue.1, pp.716-720, 2000.