

## 접합된 초전도 선재의 응용을 위한 전기적 특성 연구

장기성, 김현규, 김민재, 방주석, 이해근\*, 고태국  
 연세대학교 전기전자공학과, 고려대학교 신소재공학부\*

### Study on the electrical characteristics of the jointed superconducting tapes for power application

Ki Sung Chang, Hyoun Kyu Kim, Min Jae Kim, Joo Seok Bang, Hai Gun Lee\*, Tae Kook Ko  
 Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ.  
 Dept. of Materials Science and Engineering, Korea Univ.\*

**Abstract** - 본 논문에서는 YBCO coated conductor(CC)의 접합연구와 접합된 선재의 응용을 위한 특성연구를 수행하였다. 최근에 지속적으로 연구 개발되어 본격적으로 응용이 시작되는 CC는 기본적으로 높은 인덱스 값과 자기장에 대한 임계전류의 균일성 등 다른 고온초전도에 비해 좋은 특성을 갖고 있으며 따라서 미래의 초전도 기기에 광범위하게 사용될 것으로 예상된다. CC와 같은 초전도 선재가 초전도 기기에 적용되는 경우 대부분 초전도 선재와 초전도 사이의 접합, 초전도 선재와 상전도체 사이의 접합 등의 접합들이 존재하게 된다. 접합을 위해서는 접합 땀납이 들어가게 되고 이 부분에서 저항이 발생하게 되어 손실이 발생하게 된다. 이러한 손실은 저항이 '0'이어서 손실이 적다는 초전도기기의 장점을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있다. 따라서 CC의 접합 특성을 연구 하는 것은 초전도 기기의 성능향상에 도움을 줄 수도 있는 요인이 될 수 있다. 이 논문에서는 구리 안정화층, YBCO 층, 완충층과 기관층으로 이루어진 YBCO CC 선재를 이용하여 두 가지의 접합 방법을 이용하여 접합특성을 연구하였다.

#### 1. 서 론

최근 초전도 선재의 성능 향상과 더불어 초전도 기기의 연구 개발도 활발해지고 그에 따른 초전도 기기의 상용화도 예상되고 있다. 이러한 활발한 연구 중심에는 YBCO coated conductor(CC)가 중요한 역할을 하고 있다. YBCO CC는 높은 인덱스 값과 자기장에 대한 임계전류의 변화가 작다는 점과 교류 손실이 작다는 점 등의 특성을 가지고 있어서 현재 CC 를 이용한 초전도 기기들이 연구되고 있고 앞으로 더 많은 초전도 기기의 개발에 이용될 것으로 예상된다. CC뿐만 아니라 초전도 선재를 초전도 전력기기에 적용하는 경우 필연적으로 접합이 필요하게 되는데 초전도체와 초전도체를 열과 압력을 이용해서 직접 초전도 접합하지[1] 않는 이상 땀납이 사용되게 되고 이것은 초전도 기기의 특성인 저항이 없어서 손실이 적다는 초전도의 장점이 사라지는 직접적인 요인이 된다. 이것과 더불어 CC를 이용할 때 부분적으로 초전도 선재와 상전도 부분의 접합이 들어가게 되고 전력기기 내부에서 각 부분과의 연결을 위해서도 초전도 선재와 초전도 선재 사이의 접합이 필요하게 된다. 따라서 CC의 접합 특성을 파악하고 이것을 향상시키기 위한 연구는 초전도의 실제 응용에 있어서 매우 중요하다 할 수 있다. 이번 연구에서는 CC의 접합 특성 연구를 위해서 CC를 아무런 사전 작업 없이 자체 접합하는 방법과 CC의 구리 안정화층을 열을 통하여 제거한 후에 접합하는 방법을 사용하였다. 이러한 과정을 통해서 얻어진 접합 선재를 이용하여 임계전류와 저항 측정실험을 통해서 접합 선재의 전기적인 특성을 얻을 수 있었다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 실험 과정

접합 특성을 알아보기 위한 접합 방법은 크게 두 가지가 사용되었다. 먼저 YBCO CC선재를 제품이 나온 형태 그대로 땀납을 이용하여 자체 접합을 하는 방법이 있고 두 번째는 YBCO CC의 구조에서 구리 안정화층을 열을 가하여 떼어낸 후에 땀납을 이용하여 접합을 하는 방법이 있다. CC 선재 시편들은 동일한 릴에서 추출되었고 각 방법의 접합 특성을 알기 위해서 접합을 하기 전에 임계전류를 측정하였다. 먼저 30cm길이의 시편 4개를 준비한 후 각각 임계전류를 측정하였다. <표 1>은 30cm 길이의 시편의 임계전류와 인덱스 값을 보여준다. 그리고 30cm의 시편을 7.5cm 길이의 시편 4개로 자른 후 두 개씩 짝을 지어서 접합을 수행하였다. 접합을 수행한 후에 접합 특성을 도출하기 위하여 I-V curve를 측정하였으며 이를 통하여 접합선재의 임계전류와 접합 저항을 계산할 수 있었다.

##### 2.1 YBCO CC 선재의 접합

본 논문에서는 CC의 접합을 위해서 두 가지 방법을 수행하였다. 먼저 CC 선재를 제작된 형태 그대로 접합하는 방법, 즉 자체 접합을 수행하였다. 또 다른 방법으로는 구리 안정화층을 열을 통하여 제거한 후에 땀납을 이용하여 접합하는 것이었다. 이렇게 두 가지 방법으로 나누어서 접합을 수행한 가장 큰 이유 중에 하나는 CC의 접합 특성에 대한 구리 안정화층의 저항 성분의 영향을 알아보기 위한 것이었다. 여러 층으로 구성된 CC 선재 구조의 특성상 그대로 접합하게 되면 구리 안정화층이 초전도층 사이에 존재하게 되고 구리의 저항성분은 땀납의 저항 성분보다 더하여지게 되어 결국에는 접합 저항의 증가 효과를 가져 오게 된다. 따라서 구리 안정화층이 제거된 후에 접합이 된다면 접합 저항이 감소할 것이라고 예상하고 실험을 수행하였다.

선재의 접합 자체는 두 가지 방법에서 모두 동일하였다. 접합 길이는 5cm이었으며 접합을 위한 땀납은 Pb/Sn으로 구성된 페이스트 형태였다 [2]. 접합이 수행된 온도는 190-200 °C로 땀납이 녹는 온도를 선택하였다. 하나의 선재를 열판 위에 고정하고 접합되는 면에 땀납을 바른 후에 나머지 한 선재를 그 위에 놓고 열판으로 가열하여 땀납이 녹는 것을 육안으로 확인하였다. 땀납이 녹는 다음에는 압력을 가하면서 -8 °C의 온도에서 15분간 식혔다. 접합된 선재가 충분히 안정된 후 임계전류를 측정하기 위하여 I-V curve를 측정하였고 <표 2>와 <그림 1>과 <그림 2>에 나타난 것과 같은 결과를 얻었다.

선재의 구리 안정화층을 제거하는 방법은 열을 이용하는 것이었다. CC 제조 공정에서 구리 안정화층은 땀납에 의해서 부착되기 때문에 선재 내부의 땀납을 용융시키게 되면 구리 안정화층을 제거할 수 있다. 따라서 구리 안정화층을 제거하기 위해서 접합에서 사용된 열판을 이용하여 선재를 가열한 후에 선재 내부의 땀납을 용융시켰고 그 후 곧 바로 핀셋을 이용하여 선재의 구리 안정화층을 제거하였다. 이러한 과정은 10초에서 15초의 짧은 시간에 이뤄지게 되는데 이는 초전도 선재에 높은 온도의 열이 지속적으로 가해지게 되면 임계전류의 저하와 같은 열화 현상이 일어나 초전도 자체의 특성 저하가 생길 가능성이 존재하기 때문이다.

##### 2.3 접합 실험의 결과와 평가

접합 특성의 평가는 크게 접합 저항, 임계전류의 저하, 인덱스 값으로 이루어졌다 [3]. 접합 저항은 I-V curve에서 임계전류의 20%와 80%사이의 기울기를 측정하였고, 임계전류는 1 μV/1cm의 기준으로 측정하였다. 인덱스 값은 실제 I-V curve에서 저항의 기울기를 뺀 다음 임계전류의 0.1 값과 1값을 비교 하여 측정하였다. 임계전류의 저하정도는 원래 시편이 가지고 있던 임계전류보다 상승했을 경우에는 양의 값으로 나타내고 하강했을 경우에는 음의 값으로 된 임계전류와 비교한 비율로 표현하였다. <표 2>와 <표 3>은 각각 CC를 이용해서 그대로 접합한 것과 CC의 구리 안정화층이 제거된 것의 결과를 보여준다.

<표 1> 선재 시편의 임계 전류

시편 번호	임계전류	인덱스 값 (n-value)
1	66 A	29.15
2	74.5 A	49.88
3	69 A	38.06
4	71.5 A	27.49

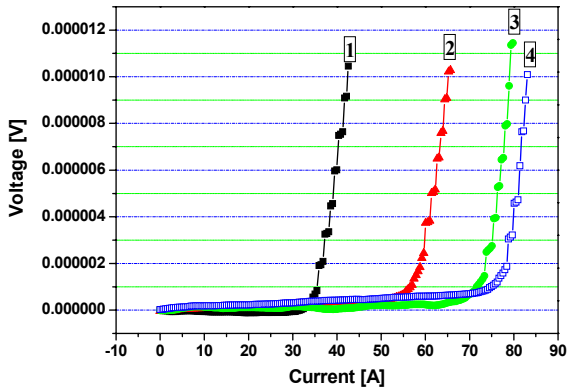
반적인 초전도 기기의 경우에는 접합된 선재를 사용함으로써 안정성 측면에서 약간의 이득을 볼 수 있을 것으로 예상된다.

### 3. 결 론

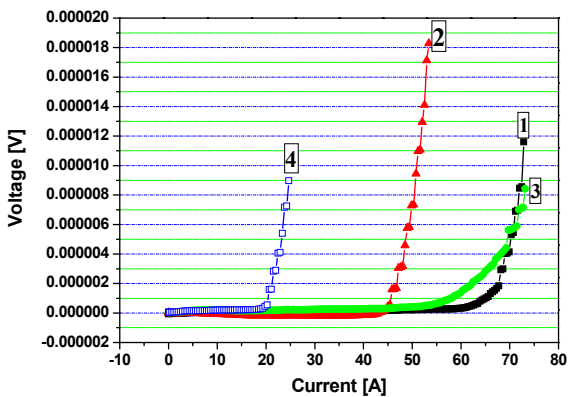
초전도 선재의 응용기기 적용을 위하여 접합 방법과 그 특성에 관한 연구는 매우 중요하다. 이를 위하여 이 논문에서는 두 가지의 방법으로 YBCO CC 선재의 접합을 수행하여 각각의 접합 특성을 살펴보았다. 접합 이전에 CC 선재에 사전 작업 없이 접합하는 자체 접합 방법과 구리 안정화층을 제거하고 접합을 하는 방법을 통하여 구리 안정화층이 접합에 미치는 영향에 대하여 알아보았다. 이를 통하여 구리 안정화층의 영향을 부분적으로 확인할 수 있었고 구리 안정화층의 제거 필요성의 여부를 접합 저항과 임계전류, 인덱스 값을 측정 비교함으로써 확인할 수 있었다. 이러한 비교 연구 결과는 향후 초전도 기기에 YBCO CC 선재가 응용되는데 직접적인 도움을 줄 수 있을 것이다. 그러나 전류가 항상 통전되는 초전도 기기의 특성상 손실 측면에서의 접합 특성을 보기 위해서 교류 손실 측정과 접합 특성의 향상을 위한 더 좋은 접합 방법의 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김재근, "coated conductor 의 접합 및 특성 평가 방법", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1285-1287, 2005
- [2] Sohn, M.H, "Joint resistances between two parallel high Tc superconducting tapes", Applied Superconductivity, IEEE Transactions, vol 13, issue 2, 1764-1767, 2003
- [3] J. Y. Kato, "Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers", Physica C, vol. 445-448, p. 686-688, 2006



<그림 1> 자체 접합 방식을 사용한 CC의 I-V curve



<그림 2> 구리 안정화층을 제거한 후 접합한 CC의 I-V curve

저항의 경우 시편 4의 경우를 제외하고는 두 개의 방법 사이에 큰 차이는 존재하지 않는다. 따라서 향후 구리 안정화층을 제거하는 연구에서는 구리 안정화층을 제거할 때 열을 가하는 시간을 변화시킨다거나 온도를 변화시켜야 할 것으로 사료된다. 그러나 경우에 따라 임계전류가 오히려 증가한 경우도 있었는데 이것은 접합이 매우 잘 수행되었을 경우 선재가 병렬연결이 되는 현상이 일어남에 따라서 임계전류가 증가한 것으로 예상된다. 인덱스 값을 비교한다면 두 가지 방법사이에는 큰 차이는 없다. 그러나 단일 선재의 경우와 인덱스 값을 비교한다면 접합 후에는 대체적으로 인덱스 값이 감소함을 볼 수 있다. 이것은 접합 후에 두 개의 선재가 병렬로 연결되는 효과로 인해서 퀀치의 속도가 늦어지는 것으로 예상된다. 이와 같은 특성은 초전도체의 빠른 퀀치 특성을 이용하는 저항형 초전도 한류기의 경우 전체적인 한류기의 성능 자체를 저하시킬 수 있다. 그러나 초전도체가 퀀치가 일어나지 않아야 하는 일

<표 2> CC 그대로의 접합 결과

시편 번호	저항	임계전류 (degradation %)	인덱스 값 (n-value)
1	3.81 nΩ	39 A (-41%)	19.26
2	6.4 nΩ	62 A (-6.1%)	18.7
3	2.34 nΩ	77 A (3.4%)	23.07
4	8.6 nΩ	78 A (4.7%)	23.42

<표 3> 구리 안정화층이 제거된 CC의 접합 결과

시편 번호	저항	임계전류	인덱스 값 (n-value)
1	4.95 nΩ	71 A (2.9%)	24.92
2	1.7 nΩ	48.5 A (-32.2%)	44.91
3	8.5 nΩ	69.5 A (-2.8%)	13.76
4	89.2 nΩ	23 A (-71.3%)	13.79