

## YBCO 2G 선재간 접합 특성 연구

장기성, 박동근, 양성은, 안민철\*, 조대호, 김현규, 고태국  
연세대학교 전기전자공학과, 기초전력연구원\*

### Charateristics analysis of the joining of YBCO 2G HTS wire

Ki Sung Chang, Dong Keun Park, Seong Eun Yang, Min Cheol Ahn, Dae Ho Jo, Hyoun Kyu Kim, Hai Gun Lee, Tae Kuk Ko  
Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univ.,  
Korea Electrical Engineering & Science Research Institute

**Abstract** - This paper deals with an efficient superconducting joint method between 2G high superconducting(HTS) wire, YBCO coated conductor(CC). Recently CC is one of the most promising superconducting wire due to high n-value and critical current independency from external magnetic field. It is expected to be used many superconducting application such as fault current limiter, persistent current system and cable etc. In most HTS applications, superconducting magnet is used, and it is necessary to joint between superconducting wire to fabricate superconducting magnet system. A CC tape used in this research consists of copper stabilizer, silver layer, YBCO layer, buffer and substrate. Direct joint using soldering method was inefficient due to resistance of copper, then copper lamination is removed by chemical etching method to reduce resistance between CC tapes. Jointed tapes were fabricated and tested. Transport current through jointed area and induced voltage were measured to characterize the I-V curve. Resistance between CC wire using chemical etching was compared with resistance of direct jointed tapes using soldering method in this paper.

## 1. 서 론

YBCO coated conductor(CC)의 개발로 한류기나 영구전류 스위치와 같은 초전도 응용기기의 성능향상이 기대되고 더 나아가 그것을 위한 CC의 특성연구와 초전도 응용기기에 대한 적용연구가 활발해질 것으로 보인다. 이러한 고온초전도체의 응용분야 중 많은 분야에서 초전도 마그넷이 이용된다. 특히 초전도 마그넷을 이용하는 MRI MAGLEV와 같은 초전도 기기는 영구전류모드로 운전된다. 영구전류모드로 초전도 마그넷을 동작하기 위해서는 초전도 권선의 양끝이 초전도 선재로 연결되어야 한다. 이 때 발생하는 접합을 어떤 방법으로 시행하느냐에 따라서 접합저항이 변화하고 접합 저항은 영구전류모드의 전체저항에 많은 영향을 끼친다. 따라서 초전도 선재의 접합저항을 줄이는 것은 영구전류스위치의 성능에 있어서 중요하다. 초전도 선재의 접합저항을 줄이기 위해서 접합되는 초전도체 사이의 저항을 줄이는 것도 한 방법이 될 수 있다. 이번 연구에서는 접합저항을 줄이기 위해서 Cu layer(stabilizer), Ag layer, YBCO layer, buffer, substrate layer으로 이루어진 CC를 화학적 에칭 과정을 통해 stabilizer를 제거하여서 가능한 전합하는 두 선재의 YBCO간의 거리를 최소화했다. 이를 통하여 에칭의 유무에 따른, 결과적으로 층의 유무에 따른 접합특성을 평가할 수 있었다.

## 2. 본 론

### 2.1 고온초전도 선재의 접합

초전도 선재의 접합결과를 평가하기 위해서 일반적으로 접합에 사용된 선재의 임계전류와 접합과정을 통과한 선재의 전류 특성을 비교하는 방법, 혹은 I-V curve에서 저항값을 계산해서 비교하는 방법이 사용된다. 먼저 선재 전체의 길이는 13cm 이었고 접합된 선재의 전체 길이는 12cm~13cm 이었다. <그림 1>에서 접합에 사용된 선재의 임계전류를 알 수 있는데 1cm/1μV criterion 을 적용할 경우 Voltage tap 의 길이가 4cm이므로 65A의 임계전류를 가지고 있음을 알 수 있다. 접합전의 선재의 I-V curve의 결과를 접합 실험 후에 임계전류 측정실험을 통해 나타난 접합 선재의 I-V curve 와 I-V curve의 기울기 계산에 의해서 도출된 저항값과 비교하여 접합특성을 평가할 수 있다. 선재의 접합은 coated conductor(CC)의 stabilizer(Cu)를 제거하지 않고 접합하는 경우와 stabilizer를 에칭을 통해서 제거한 후에 접합하는 경우로 나누어서 시행했다. Stabilizer를 제거하지 않은 경우에는 lap-joint 와 1개의 선재를 덧대는 방식으로 접합한 경우의 두

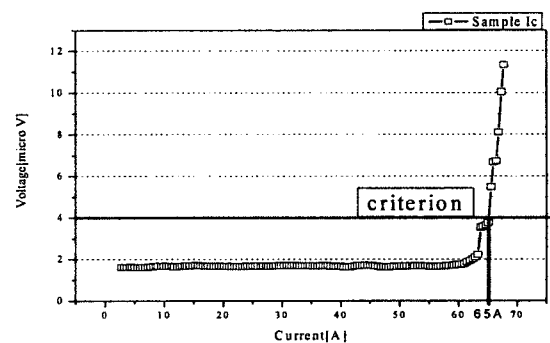
가지를 병행했다.

### 2.1.1 CC의 접합 방법

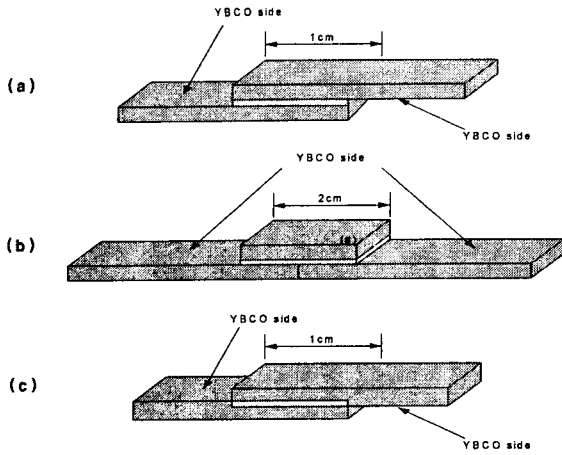
본 연구에서는 세 가지의 방법을 이용한 CC의 접합특성을 다루었다. <그림 2>의 (a)와 같이 첫 번째 방법은 에칭과정을 거치지 않은 CC선재를 lap-joint 를 통하여 접합하는 것이고, 두 번째 방법은 <그림 2>의 (b)와 같이 에칭과정을 거치지 않은 CC선재를 접합부에 짧은 CC선재를 덧대는 방식으로 접합하는 것이다. 마지막 방법은 <그림 2>의 (c)와 같이 선재의 stabilizer 층을 에칭을 통해서 제거한 다음 lap-joint 방식으로 접합하는 것이다. 모든 접합에서 solder는 rod 형태의 indium 을 사용하였고 열과 압력을 동시에 가했다. 열을 가할 때의 주의점은 CC선재의 제조과정에서 Cu stabilizer의 접합을 위해서 사용된 solder의 녹는점이 170°C이고 indium solder의 녹는점이 70°C이므로 이 사이의 온도를 유지하면서 압력을 가해야 하는 것이다. substrate 층의 유무를 확인하기 위해서 선재를 에칭용액에 넣어서 변화되는 색에 의해 어느 면에 substrate가 있는지 확인했다.

첫 번째 접합과 두 번째 접합은 접합형태만 다를 뿐 그 이전 과정과 열과 압력을 가하는 방법은 동일하게 시행했다. 선재를 동일한 길이로 자른 다음 YBCO층이 가까운 면을 알코올을 이용해서 세척해준 후 Cu 판을 이용해서 전도를 통해 열을 가했다. 첫 번째 방법에서는 한쪽 선재만 먼저 가열해서 solder를 바른 다음 다른 선재를 YBCO면이 맞닿을 수 있도록 위치시키고 열과 압력을 가해주었다. 두 번째 방법에서 앞의 방법과 다른 점은 solder를 덧대어지는 선재에 바르다는 점과 두 선재를 나란히 배치시키고 그 위에 solder가 있는 짧은 선재를 얹어서 열과 압력을 가한다는 것이다.

세 번째 방법은 접합 이전에 선재에 에칭을 가해서 substrate가 없는 쪽의 stabilizer를 제거하고 접합하는 것이다. 에칭하는 과정은 우선 선재를 동일한 길이로 자른 다음 접합 길이를 선재에 표시해준다. 그 다음 에칭을 가하지 않는 면과 에칭 되는 면에서 접합부위를 제외한 모든 부분에 캡톤 테이프를 붙여서 불필요한 에칭이 일어나지 않도록 선재를 보호해주었다. 본 에칭작업을 할 때에는 접합부위에 질산 수용액을 소량씩 가하다가 증류수로 세척해주면서 선재의 외형적인 변화를 확인했다. 에칭이 과도하게 되어서 stabilizer의에 그 밑의 layer까지 부식되는 일이 없도록 에칭과정이 길어질수록 자주 증류수로 세척했다. 에칭과정을 마치면 부식된 면을 세척해두고 첫 번째 방법과 동일하게 접합한다. 주의할 점은 Cu stabilizer가 제거되었으므로 solder를 바를 때 무리하게 압력을 주지 않도록 하는 것이다. 무리하게 압력을 가했을 경우에는 YBCO층이 손상될 위험이 있기 때문이다.



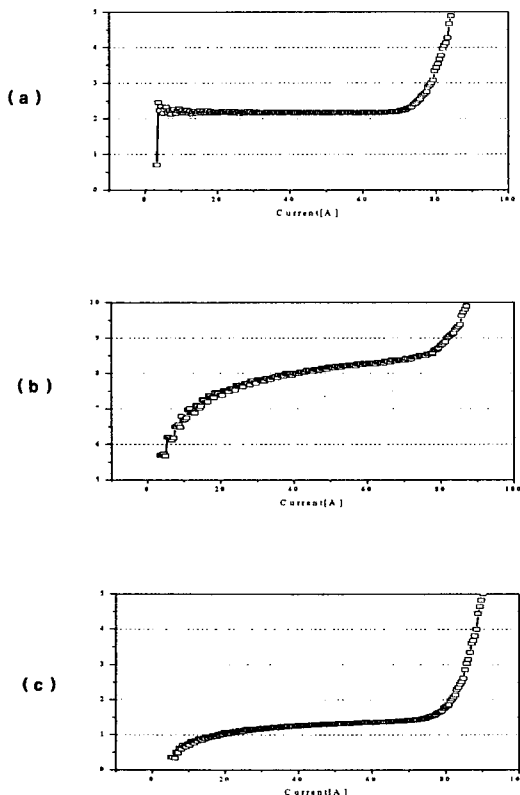
<그림 1> 접합에 사용된 선재의 I-V curve



<그림 2> (a) lap joint, (b) 접합부에 짧은 CC선재를 덧대는 방식으로 접합, (c) 선재의 stabilizer 층을 에칭을 통해서 제거한 후 lap-joint

### 2.2 접합특성평가 방법

접합특성은 접합하기 전의 선재의 I-V curve와 접합 후 선재의 I-V curve를 비교해서 평가했다. voltage tap은 접합부분을 중앙에 배치시키고 4cm의 거리로 배치했다. 전류를 증가시키는 시간과 선재의 전체 길이 등 접합을 제외한 조건을 접합하기 전과 후를 동일하게 했다. 본 연구의 결과는 각각의 방법으로 세 번씩 접합을 수행한 후에 접합특성이 좋은 경우를 선택한 것이다. 접합 후 선재들의 I-V curve의 특징은 1cm/1 $\mu$ V criterion을 적용할 경우 접합부분에서의 임계전류는 최대 7A를 넘지 않았다는 것이다. 기존연구[1]에서 알 수 있듯이 CC의 경우 접합 후에 접합부분의 특성이 초전도 성질을 접합 이전의 상태만큼 유지하지 못하는 것으로 보인다. 앞으로 보안을 거쳐서 접합방법을 개선하거나 다른 방법으로 접근하는 것이 필요하다.



<그림 3> 선재의 접합저항곡선 (a) lap-joint, (b) 선재를 덧대어서 접합, (c) 에칭 후 lap-joint

<표 1> 선재접합의 사양

	접합길이	접합저항	에칭 유무
(a)	1cm	2.1~2.2 $\mu\Omega$	x
(b)	2cm	7~8.4 $\mu\Omega$	x
(c)	1cm	1~1.4 $\mu\Omega$	o

### 2.3 접합특성평가

이번 연구의 목적은 에칭을 통한 stabilizer의 에칭을 통하여 제거하였을 때 접합특성의 향상을 확인하는 것이었다. <그림 3>과 <표 1>에서 확인할 수 있듯이 선재에 에칭을 가해서 stabilizer를 제거할 경우 접합저항이 접합 방법에 따라 근소한 차이로 감소했다. 각 접합의 저항 곡선을 보면 전류가 가해지는 동안 대체적으로 저항의 값이 일정하다는 것을 확인할 수 있고 접합 저항만을 가지고 접합방법을 평가하면 lap-joint 방법이 그렇지 않은 것보다 특성이 더 나왔다. 선재를 덧대는 접합 방법은 접합되는 길이 자체가 더 길었고 그에 따라서 열과 압력을 전체적인 접합부위에 고르게 가하는 것이 더 어려웠기 때문에 접합특성이 안 좋은 것으로 판단된다. 에칭의 유무에 따른 접합특성은 에칭을 통해서 stabilizer를 제거한 것이 제거하지 않은 것보다 약 50%정도의 저항이 감소할 정도로 더 나은 것으로 확인되었다. 그러나 전체적으로 초전도 응용기기에 사용되기에는 미흡한 것으로 판단된다. 앞으로 보안을 거쳐서 접합방법을 개선하거나 다른 방법으로 접근하는 것이 필요하다.

### 3. 결 론

최근 CC의 개발에 따른 초전도 전력기기의 성능향상과 더불어 CC의 특성연구와 초전도 응용기기에 대한 적용연구가 활발하게 진행되고 있다. 이 중에서 고온초전도 전력기기, 특히 초전도 마그넷이 사용되어 영구전류스위치가 필요한 MRI, MAGLEV등과 같은 응용기기들은 초전도 선재의 접합이 필요하고 이러한 기기들에 CC를 적용하기 위해서는 CC의 접합방법 연구와 접합특성평가 방법에 대한 연구가 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 CC 선재를 세 가지의 접합방법, lap-joint, 부가적인 선재를 덧대어서 수행하는 접합방법, 에칭을 통해서 stabilizer 층을 제거한 후에 접합하는 방법을 수행하였다. 세 가지 방법의 접합특성평가와 그 비교는 각각의 I-V의 curve를 통해서 전류에 따른 저항 그래프를 구하고 그에 따른 평균적인 저항을 비교하였다. 결과적으로 에칭을 통해서 stabilizer를 제거한 후에 접합하는 방법의 접합특성이 다른 방법에 비해 최대 50%정도 우수한 것으로 확인되었다. 그러나 접합저항 뿐만 아니라 접합부분에 흐르는 전류특성에서 초전도 전력기기에 응용되기에는 부족한 것으로 판단되었다. 따라서 새로운 접합방법을 모색함과 동시에 실험하고 있으며 앞으로 향상된 접합 방법을 찾을 수 있을 것이라 기대된다.

이 논문은 2005년도 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-090) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김재근, "coated conductor의 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] Jung Ho Kim, "Properties of resistive- and superconducting-joints in Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O tape", Applied Superconductivity, IEEE Transactions, Vol 11, Issue 1, 3010-3013, 2001