

# BSCCO(2223) 다심선재의 초전도 접합공정 연구

김규태, 김정호, 장석현, 주진호, 나완수\*  
성균관대학교 금속재료공학부, 전기전자컴퓨터공학부\*

## Fabrication of Superconductive Joining of Multi-filamentary BSCCO(2223) Tape

Kyu Tae Kim, Jung Ho Kim, Seok Hern Jang, Jinho Joo, and Wansoo Nah\*  
School of Metallurgical and Materials Engineering  
School of Electrical and Computer Engineering\*, Sungkyunkwan University

E-mail : [hotnews1@hanmail.net](mailto:hotnews1@hanmail.net), [jinho@skku.ac.kr](mailto:jinho@skku.ac.kr)

**Abstract** - We jointed BSCCO multi-filament tapes and evaluated their electrical properties. In the process, two superconductive-joint methods were used; the two multi-filament tapes were directly connected each other(MM joint), and were connected through the single-filament tape inserted between them(MSM joint).

It was observed that critical current ratio and n value were 25-29% and 2.5-2.8 for MM jointed tape, and 34-53% and 3.7-4.2 for MSM jointed tape, respectively. The higher electrical properties for MSM tape is considered to be due to that the presence of single core results in better interconnections of multi-filaments from the two tapes.

### 1. 서 론

초전도 재료는 한류기, 발전기, 모터, 마그네트, 변압기, 송전케이블 등 다양한 첨단기기에 응용될 수 있는 신소재로 각광받고 있다. 이러한 초전도 재료를 응용한 전력기기들을 개발하기 위해서는 초전도체-초전도체, 초전도체-전류인입선 사이의 접합기술이 필요하다.

특히 MRI용 마그네트 등의 영구전류모드 상태에서 작동해야하는 기기에서는 초전도 접합이 핵심기술로 요구된다. 초전도 접합은 마그네트와 영구전류스위치 간의 연결에 필요하며, 이 때 마그네트와 영구전류스위치 간의 접합저항은  $10^{11} \Omega[1]$  이하로 제어될 때  $10^8$  A/h 미만의 전류감소를 가질 수 있다. 일반적으로 PIT법에 의해 제조된 선재는 기계적 특성과 전기적 특성을 향상시키기 위해 다심 선재로 제조되고 있다. Fujikami et al.[2]은 Ag/BSCCO 다심선재의 여러 가지 접합 방법 및 공정 변수 등을 제안하였으나 multi-filament와 multi-filament 사이의 정확한 연결이 어려워 접합 부분에서의 통전율 저하를 극복하지 못하고 있다[3].

본 실험에서는 BSCCO 다심선재의 접합에서 이러한 multi-filament 간의 정확한 연결을 위해 다심선재를 서로 접합시키는 한편(Multi-Multi 법, 이하 MM 법), 다심선재와 다심선재간의 연결부에 한 개의 단심선재를 삽입하여 단심 core를 통하여 서로 연결하는 방법(Multi-Single-Multi 법, 이하 MSM 법이라 함)을 이용하여 압력변수에 따른 통전율의 변화와 저항전이지수(n 값)에 대해 연구하였다.

### 2. 실험방법

Bi : Pb : Sr : Ca : Cu : O 조성이 각각 1.8 : 0.4 : 2 : 2.2 : 3 : X (Bi-2223)가 되도록  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , PbO,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ , CuO 분말을 혼합시킨 후 하소처리하여 Bi-2223 분말을 제조하였다. 제조된 분말을 Ag tube에 충전시킨 후 단면 감소율을 10%로 하여 직경 2.0 mm까지 인발하였으며, 최종 육각 인발 후 19개로 절단하여 대구경의 은 튜브에 삽입 후 재인발하였다. 이후 압연과정을 거쳐 두께와 폭이 각각 250  $\mu\text{m}$ , 3.2 mm인 tape 형태로 가공하였으며 840°C 대기 분위기에서 50시간 열처리하였다.

초전도 접합은 lap-joint 방법을 택하였으며, 접합부만을 부식액으로 제거한 후 초전도 심(core)이 서로 접촉되도록 배열하고 단일축 압력을 가하여 제조하였다. 그림 1에서 보듯이 MM 접합은 두 다심선재의 접합부 윈도우를 서로 접촉시키고 1000-2500 MPa의 범위에서 가압하여 제조하였으며, MSM 접합은 단심선재를 이용하여 두 개의 다심선재가 단심 core를 통하여 연결되도록 접합하였다. 접합선재는 840°C, 대기분위기에서 50시간 재소결처리를 하였다.

임계전류값은 77 K, 0 T, 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 4단자법으로 측정하였다. 저항전이지수(n 값)는  $V = k I^n$  으로부터  $1 \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 5 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전계 범위에서 측정하였으며 초전도선재의 미세조직은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

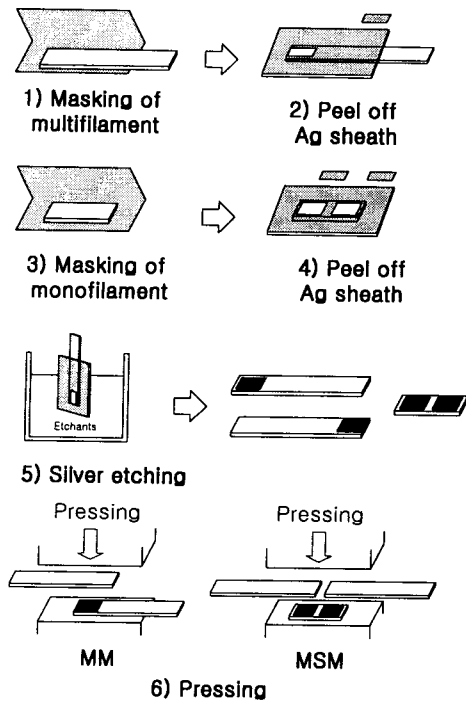


Fig. 1. The schematic of process of (a) MM and (b) MSM lap-joint

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 840°C 대기분위기에서 150 시간 열처리 한 다심 비접합선재의 V-I 곡선이다. 임계전류값 ( $I_c$ )은 15.0 A 이고,  $1 \mu V/cm \leq E \leq 5 \mu V/cm$ 의 전계범위에서 측정된  $n$  값은 19.5 로 계산되었다. 일반적으로 Bi-2223 선재의  $n$  값이 15~20 정도로 보고되고 있으며 측정된 값은 문헌값과 유사함을 알 수 있다.

그림 3은 각각 MM, MSM lap-joint 방법을 이용하여 제작된 접합 선재의 압력변수에 따른 통전율의 변화를 나타낸 그래프이다. MM의 경우는 1000~2500 MPa의 압력에서 약 25-29%의 통전율을 보이고 있으며 압력이 증가하여도 통전율의 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

단심선재를 접합한 이전의 연구에서 통전율이

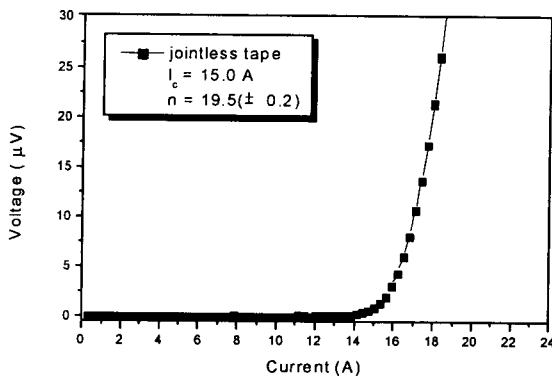


Fig. 2. The V-I curve of jointless tape

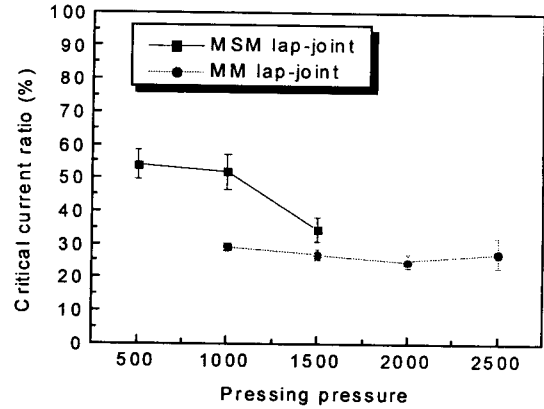


Fig. 3. Critical current ratio as a function of uniaxial pressing pressure

최고 약 60%-80% 범위로 나타난 연구결과와 비교하면 MM 접합선재의 통전율은 상당히 낮게 나타났다. 이는 다심선재에서 상대적으로 작은 단면적을 갖는 다수의 필라멘트를 정확하게 연결 (match) 시키기가 곤란하기 때문으로 사료된다.

MSM lap-joint의 경우는 통전율이 압력변수에 따라 34~53%의 범위를 갖고 있다. 특히, 500 MPa와 1000 MPa에서 통전율이 각각 53.9%와 51.8%로 MM 접합선재와 비교하여 상당히 높게 나타났으며, 1500 MPa에서는 34.5%로 감소하였다. 전반적으로 통전율값이 MM 보다 더 높게 나타난 것은 두 개의 다심선재에서 각각의 filament 들이 접합부에 위치한 단심선재의 초전도 심(core)을 통하여 잘 연결되었기 때문으로 사료된다.

MSM 접합선재에서는 MM에서와는 달리 가압 정도에 따라 통전율이 변화하며 임계압력값이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 압력에 의하여 다심선재의 filament가 단심 core 내부로 침투하여 core의 균일성을 불규칙하게 변화시키기 때문으로 판단된다. MSM 접합공정에서 최적 압력변수를 파악하기 위하여 현재 압력범위를 500 MPa 이하에서부터 2500 MPa로 다양하게 변화시키고 있으며, 또한 두 개의 단심선재를 다심선재 연결부의 각각 상,하로 위치시켜 접합하는 공정도 시도하고 있다.

그림 4는 MM, MSM lap-joint 방법을 이용하여 제작된 접합 선재의 압력변수에 따른  $n$  값의 변화를 나타낸 그래프이다. 압력변수에 따른 접합선재에서 측정된  $n$  값은 비접합선재에서 보다 상당히 감소한 것으로 측정되었다. 즉, MM 접합선재에서는 1000-2500 MPa 가압범위에서 약 2.5-2.8, MSM 접합선재에서는 500-1500 MPa 범위에서 약 3.7-4.2로 나타났다.  $n$  값이 비접합선재에 비하여 현저하게 감소한 이유는 접합부에서 발생한 불균일한 미세조직에 기인하는 것으로 사료된다.

그림 5는 1500 MPa의 압력으로 제조한 MSM 접합부의 SEM 사진이며 위층은 단심선재이고 아래층은 단심선재이고 위층이 다심선재를 나타

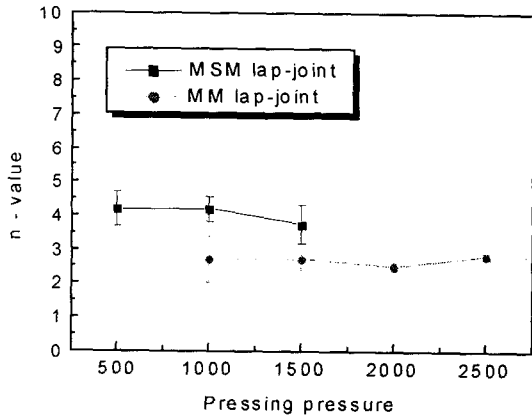


Fig. 4. N-value as a function of uniaxial pressing pressure

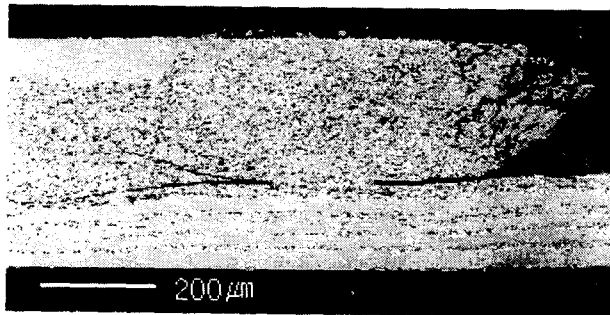


Fig. 5. The SEM image of joined area of MSM specimen pressed on 1000 MPa

내고 있다. 전체적으로 다심선재의 filament가 단심선재의 초전도 core에 균일하게 연결되어 있으나, 가압공정으로 인해 접합부의 transition 영역에서 core의 노출, 불균일한 변형 및 균열(crack)이 발생한 것을 알 수 있다. 그러므로 공정변수를 최적화하여 접합부의 불균일한 미세조직을 적절하게 제어한다면 통전율 및 n 값을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

BSCCO-2223 초전도 다심선재를 초전도 접합

하였으며 임계특성과 미세조직을 평가하였다. MM 접합선재에서는 통전율이 25-29%, n 값은 2.5-2.8 로 나타났으며 단일축 압력에는 크게 변화하지 않는 것으로 관찰되었다. 반면에 MSM 접합선재에서는 통전율이 34-53%, n 값은 3.7-4.2 정도로 MM 보다는 우수하게 나타났다.

MSM 선재에서 상대적으로 우수한 특성은 다심선재의 filament 들이 접합부에 위치한 단심선재의 초전도 심(core)을 통하여 잘 연결되었기 때문으로 사료된다. 미세조직 관찰결과 접합선재에서 임계특성의 감소는 접합부에서 형성되는 불균일한 미세조직 때문으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K. Fukushima, M. Okada, J. Sato, T. Kiyoshi, H. Kumakura, K. Togano, and H. Wada, "Persistent mode operation of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x/\text{Ag}$  stacked double pancake coils with superconducting joints", Jpn. J. Appl. Phys. vol. 36, pp. L1433-1435, 1997
- [2] J. Fujikami, K. Sato, N. shibuta, H. Mukai and T. Kato, US Patent 5,385,929, 1994
- [3] J. H. Kim, and J. Joo, "Fabrication and characterization of the joining of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape", Supercond. Sci, Technol.vol. 3, no. 13, pp. 237-243, 2000
- [4] J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, P. J. Bednarczyk, M. F. Garbauskas, B. A. Jones, R. J. Kilmer, and K. W. Lay, "Superconducting joints formed between powder-in-tube  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z/\text{Ag}$  tapes", IEEE Appl. Superconductivity, vol. 3, no. 1. pp.946-948, 1993