

## 37심 BSCCO(2223) 다심 초전도선재의 접합공정 연구

김정호, 오승진, 김규태, 김호진, 주진호, 나완수\*  
성균관대학교 금속재료공학부, 전기전자컴퓨터공학부\*

### Fabrication of Joining of 37 Multi-filamentary BSCCO(2223) Tape

Jung Ho Kim, Seung Jin Oh, Kyu Tae Kim, Hojin Kim, Jinho Joo,  
and Wansoo Nah\*

School of Metallurgical and Materials Engineering,  
School of Electrical and Computer Engineering\*, Sungkyunkwan University

E-mail : [dune7414@hanmail.net](mailto:dune7414@hanmail.net), [jinho@yurim.skku.ac.kr](mailto:jinho@yurim.skku.ac.kr)

**Abstract** - We evaluated the electrical properties of 37 multifilamentary jointed tapes processed by superconducting joint. In the superconducting joining method, a lap-joint was used. Tapes were selectively etched and exposed superconducting cores of the two tapes were brought into contact with each other and then only the joined region was uniaxially pressed in the range of 1,000 to 2,500 MPa. The current carrying capacity and n-value of the jointed tape were evaluated as a function of uniaxial pressure. The highest current carrying capacity and n-value were obtained to be 58%, 26% for the jointed tape to the tape itself.

## 1. 서 론

Bi 계 초전도 선재가 발견된 이후 높은 임계 온도( $T_c$ )와 임계전류밀도( $J_c$ )를 갖는 선재에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 최근 미국 ASC사에서 개발된 BSCCO(2223) 초전도 선재는 길이는 수 km, 임계전류값은 77 K에서 약 100 A 정도로 큰 발전을 보였으며, 기계적 특성도 우수한 초전도 선재가 제조되고있다. 이 정도의 특성을 갖고 있는 초전도선재의 경우 MRI(자기공명 단층촬영장치) 용 마그네트, 송전선, 변압기 등 실제 산업체에서 전력기기에 응용될 수 있을 것으로 전망되고 있다.

일반적으로 MRI 용 마그네트는 영구전류모드(PC-모드)상태에서 작동하는데, 이때 초전도 접합은 핵심기술로 필요하다. 초전도 접합은 마그네트와 영구전류스위치간의 연결에 필요하며, 영구전류모드 운행 특성상 마그네트와 영구전류스위치와의 접합저항은  $10^{-11}\Omega$  이하를 가져야 하며[1], 이를 시스템에 적용하면  $10^{-8}$  A/h 이

하의 전류감소율을 가질 수 있다. 그러나 BSCCO(2223) 초전도 선재의 접합공정에 대한 연구는 아직 미비하며 주로 단심선재에만 국한되어 연구되었다. 초전도 선재를 이용한 전력기기에 실제 적용시에는 다심선재간의 접합과 infra-red ramp[2] 등을 이용한 부분열처리 공정에 대한 연구가 필요하다. 특히, 다심선재 접합의 경우 단심선재의 접합과 달리 필라멘트간의 연결이 어려워 필라멘트간의 연결을 향상시키는 접합방법을 연구하여야 하며 높은 임계전류특성, n 값, 그리고 우수한 접합저항을 갖는 공정방법이 연구되어야 한다.

그러므로 본 연구에서는 37심 다심선재를 lap-joint 방법으로 접합선재를 제조하여 단일축 압력변수와 접촉부 형상에 따른 통전율과 n 값 변화에 대해 연구하였으며, 접합부의 특성과 공정변수 및 미세조직과의 연관성에 대하여 평가하였다.

## 2. 실험 방법

전체조성이  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_x$ (2223)인 초전도 분말을 은튜브에 삽입한 후 시편을 인발하였다. 인발이 끝난 시편은 다시 최종 육각 인발 후 37개로 절단하여 대구경의 은튜브에 삽입 후 재인발하였다. 재인발한 선재는 압연과정을 거쳐 두께와 폭이 각각  $250\ \mu\text{m}$ ,  $4.4\ \text{mm}$ 인 선재로 제조되었다. 소결은  $840^\circ\text{C}$ , 대기분위기에서 150시간 열처리하여 초전도 선재를 제조하였다.

초전도 접합은 lap-joint 방법을 택하여, 접합부( $10.0 \times 4.2\ \text{mm}^2$ )만을 부식액으로 제거한 후 다시 기계적 방법과 화학적 방법( $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O} = 12.5/12.5/1$ )으로 접합부 원도우를 스텝형태로 만들어 접합부를 제조하였다. 접합부는 필라멘트간의 연결을 최적화하기

위해서 스텝의 수를 다양하게 제조하였으며 접합부 가압압력은 1,000~2,500 MPa의 범위에서 가압하여 접합선재를 제조하였다. 접합선재는 840°C, 대기분위기에서 50시간 재소결처리를 하였다.

임계전류값은 77 K, 0 T, 1 μV/cm를 기준으로 하여 4-단자법(four-probe method)법으로 측정하였다. 저항전이지수(n 값)는  $V = k I^n$  으로부터  $1 \mu V/cm \leq E \leq 5 \mu V/cm$ 의 전계범위에서 측정하였으며 초전도선재의 미세조직은 광학현미경과 XRD 분석을 통해 관찰하였다. 2223 상의 분율은 다음 식에 의해 계산하였다.

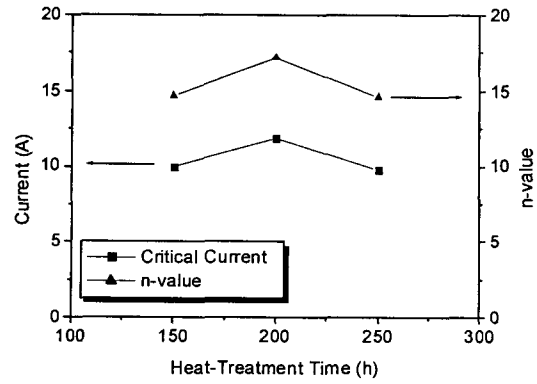
$$\text{Volume fraction of 2223} = \frac{I_{2223(0014)}}{I_{2212(0012)} + I_{2223(0014)}} \quad (1)$$

이 식에서  $I_{2212(0012)}$ 은 2212상의 (0 0 12)면에 대한 X-선 회절강도,  $I_{2223(0014)}$ 은 2223상의 (0 0 14)면에 대한 X-선 회절강도를 의미한다.

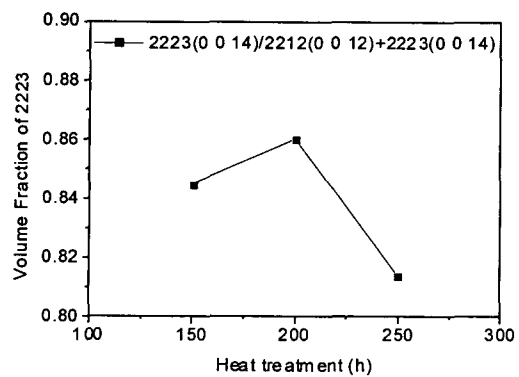
### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 비접합선재의 최적열처리 조건을 파악하기 위해서 열처리시간을 변화시켜 선재의 임계전류값, n 값, 2223 상 분율을 측정하였다. 그림 1(a)에서와 같이 열처리시간이 총 150 시간일 때 임계전류값은 10.0 A, 열처리시간이 200 시간일 때 선재의 임계전류값은 11.9 A, 열처리시간이 250 시간일 때는 임계전류값이 9.8 A로 측정되었으며 n 값 또한 각각 14.7, 17.2, 14.6으로 계산되었다. 그림 1(b)의 2223 상분율은 식 (1)을 통해 계산하였다. 150 시간까지 소결한 선재의 경우 2223 상분율은 0.84, 200 시간일 때는 0.86, 250 시간일 때는 0.81로 계산되었다. 결과적으로 임계전류값과 n 값을 측정한 결과 초전도 접합선재의 최적열처리 조건은 총 200 시간임을 알 수 있었으며 이는 2223 상분율의 변화와 일부 연관이 있을 것으로 판단된다. 그러므로 150시간 열처리한 선재를 접합 후 50시간 재열처리를 하였을 때 우수한 임계특성을 가질 것으로 사료된다.

그림 2는 접합선재의 윈도우를 1~3 개의 다양한 스텝형태로 제조하여 압력범위 1,000~2,500 MPa로 가압한 후 비접합선재에 대한 접합선재의 임계전류의 비, 즉, 통전율(Critical Current Ratio, CCR)을 측정한 그림이다. 그림에서 보듯이 같은 윈도우형태를 갖고있는 경우에는 압력이 1,000 MPa에서 2,500 MPa로 증가할수록 통전율의 변화가 거의 없었으며, 스텝의 수가 증가할수록 임계전류값이 향상됨을 알 수 있다. 통전율의 경우 1 step의 시편에서 압력범위에 따라 24.8~29.0%, 2 step의 시편에서 35.0~39.5%, 3 step의 시편에서 46.4~51.1%로



(a)



(b)

Fig. 1. (a) Critical current and n-value and (b) Volume fraction of 2223 phase as a function of heat treatment time

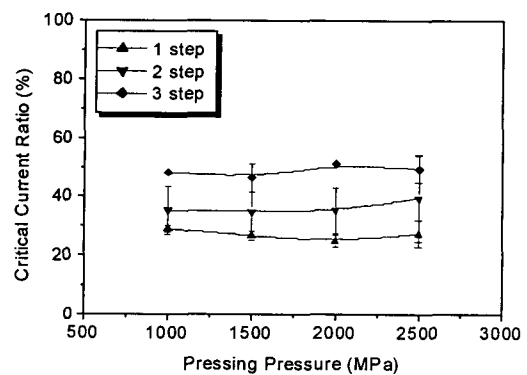


Fig. 2. Dependence of the ratio of critical current on the number of steps and uniaxial pressure

향상되었다. 이는 스텝의 수가 증가할수록 필라멘트간의 연결이 될 확률이 높아지기 때문으로 사료되며 이 결과는 임계압력값을 갖는 단심선재의 접합결과와 다르게, 다심접합의 경우 스텝의 수에 따라 통전율이 변화하는 것을 알 수 있다[3].

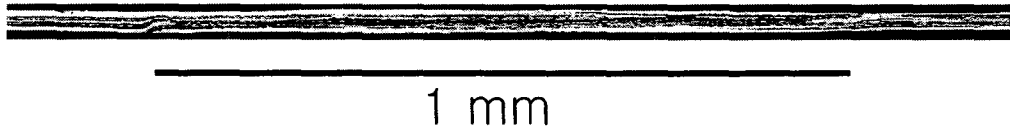


Fig. 3. Optical micrograph of a longitudinal cross section for lap-jointed tape made of 2 step method

그림 3은 2 step으로 제조되어진 선재의 횡측단면 사진을 나타내었다. 2 step의 경우 전체적으로 균일한 형상을 가짐을 알 수 있었으며 스텝형상으로 인한 접합부 중심에서 넓은 부분의 필라멘트간의 접합이 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 천이부분에서 은이 침투하는 현상도 관찰되었다.

그림 4는 접합선재의 n 값을 나타낸 그림이다. 같은 압력범위에서 1 step의 경우 n 값은 2.5~2.8, 2 step의 경우는 2.8~3.4, 3 step의 경우는 2.9~3.6 범위를 갖고 있었다. 접합선재의 경우 스텝의 수가 증가할수록 n 값은 거의 비슷하거나 미세하게 증가하였으며 이 값들은 비접합선재의 n 값(14.7)에 비해 현저히 낮음을 알 수 있었다. 이는 접합계면의 형상이 불균일하고 개개의 필라멘트간의 연결이 불완전함으로써 큰 저항성분이 발생하여 낮은 n 값을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 n 값은 초전도체의 미세균열, sausaging 효과, grain 간의 연결성 약화 등으로 인하여 감소한다.

#### 4. 결 론

37 심 다심선재를 초전도 접합방법을 이용하여 단일축압력에 따른 통전율과 n 값을 측정하였다. 초전도 접합선재의 접착부형상은 1~3 개의 step을 만들어 제작하였으며 1,000~2,500 MPa의 단일축압력을 가하였다. 다심초전도 접합선재에서는 단심선재에서와는 달리 통전율이 단일축가압의 정도에는 거의 변화가 없었으며, 스텝의 수에는 영향을 받는 것으로 평가되었다. 일반적으로 step의 수가 증가함에 따라 필라멘트간의 연결이 잘되었기 때문에 판단된다.

접합선재의 미세조직은 대체로 균일하였으나 천이지역에서 은이 침투하여 불균일한 형상이 관찰되었으며 이는 접합선재의 통전율과 n 값을 저하시키는 요인으로 사료된다.

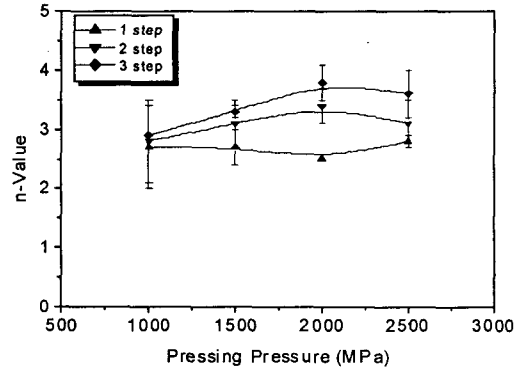


Fig. 4. Dependence of n-value on the number of steps and uniaxial pressure

#### [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] M. Naylor, Department of Materials, University of Oxford. Private communication, 1997
- [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. 13, no. 2, pp. 237-243, 2000