

## Development and fabrication of multi-filamentary Bi(2223)/Ag jointed tape

Kyu Tae Kim<sup>a</sup>, Jung Ho Kim<sup>a</sup>, Ho Jin Kim<sup>a</sup>, Dong Wook Lee<sup>a</sup>, Jinho Joo<sup>a</sup> and Wansoo Nah<sup>b</sup>

<sup>a</sup> School of Metallurgical & Materials Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea

<sup>b</sup> School of Electrical & Computer Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Korea

Received 20 August 2002

## Bi(2223)/Ag 다심 초전도 접합선재의 제조

김규태<sup>a</sup>, 김정호<sup>a</sup>, 김호진<sup>a</sup>, 이동욱<sup>a</sup>, 주진호<sup>a</sup>, 나완수<sup>b</sup>

### Abstract

Critical current ratio and  $n$ -value of Bi(2223)/Ag superconducting joint tape were measured as a function of uniaxial pressure. In the superconducting joint method, MM and MSM joint were used ; MM joint is direct connection of two-multi filamentary tapes, and MSM is connection of them by using a single-filamentary tape. It was observed that the critical current ratio(CCR) for jointed tapes was not dependent on the uniaxial pressure but joining methods. The  $n$ -value of jointed tapes has similar trends with that of the CCR. Especially, double MSM joint showed the highest electrical properties as 63.4 - 76.0%(CCR) and 3.5-5.1( $n$ -value). It is considered that the improvements are due to the better interconnections of multifilaments by two single filamentary tapes on both sides.

*Keywords* : Critical current ratio, Microstructure, Superconducting joint

### I. Introduction

초전도 선재를 다양한 초전도응용 기기의 적용을 위해서는 초전도 특성의 저하가 없는 초전도 접합기술의 확립이 요구된다. 초전도 선재에 있어서 접합기술은 초전도 subunits, busbar, current lead 등의 부분적인 연결에 필요하고, MRI 나 NMR 에 필요한 영구전류스위치를 제작하는 데에도 반드시 필요하다[1], [2].

초전도 접합 선재의 특성의 감소는 초전도시

스템에 적용되는 전체 선재의 특성의 감소로 연결된다. 이러한 특성을 향상시키기 위한 상전도 접합과 초전도 접합에 대한 연구가 다양하게 시도되어 왔으나 초전도 접합 방법에 대한 대부분의 연구는 BSCCO 단심 선재에 대해서만 이루어져 왔다[3], [4]. 그러나, 실제 적용을 위해서는 다심선재에 대한 초전도 접합이 확립되어야 하고, 체계적으로 수행되어야 한다.

기존에 발표되었던 다심선재의 접합 결과에서는 30~50% 의 critical current ratio(CCR)를 얻을 수 있었고, 이는 단심선재의 것보다 훨씬 작은 값을 가진다[5], [6]. 이는 초전도접합에서는 각각의 필라멘트가 정확하게 연결되어야 하

\*Corresponding author. Phone : +82 31 290 7385,

Fax : +82 31 290 7371, e-mail : jinho@skku.ac.kr

는데 다심선재에 대한 접합의 공정이 단심선재의 경우보다 더 복잡하고 어렵기 때문이다.

본 실험에서 고안한 기본적인 접합공정은 필라멘트의 연결성을 향상시키기 위해 두 다심선재 사이에 단심선재를 삽입시키는 것이다. 본 실험에서는 19심 다심선재를 제조하여 여러 가지 방법으로 접합하고, 이들의 전기적인 특성을 측정하여 미세조직과의 연관성에 대해 연구하였다.

## II. Experimental Procedure

$\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_x$  (Bi-2223)가 되도록  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  분말을 혼합시킨 후  $720^\circ\text{C}$ ~ $820^\circ\text{C}$ 에서 24시간 하소처리 하여 Bi-2223 분말을 합성하고, 일반적인 powder-in-tube(PIT) 법으로 19심 선재를 제조하였다. 이후  $840^\circ\text{C}$  대기분위기에서 50시간 열처리하였고, 최종두께와 폭은 각각  $250\ \mu\text{m}$ ,  $3.1\ \text{mm}$  이다.

접합공정은 fig. 1에서와 같이 세 종류의 다른 방법으로 행하였다. 첫번째, 다심선재의 노출된 한쪽의 core 가 서로 직접 접촉되도록 접

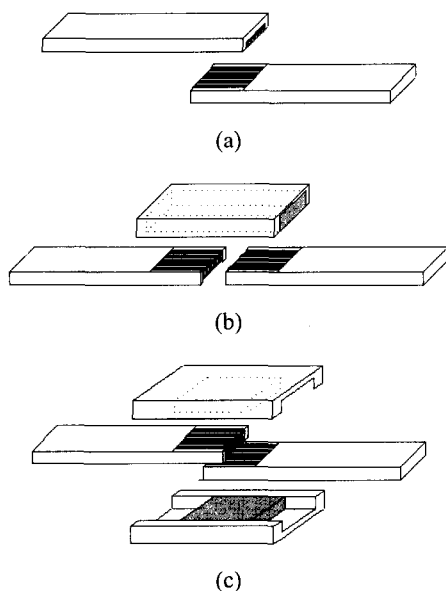


Fig. 1. Schematic of the multifilamentary jointed tapes of (a) MM-, (b) MSM-, and (c) double-MSM-joint.

합하였다. 두 번째, 두 개의 다심선재가  $0.5\ \text{cm}$  떨어지도록 놓고, 그 위에 같은 크기로 core 가 노출된 단심선재가 접촉되도록 접합하였다. 세 번째, 두 개의 다심선재의 양쪽에 window를 만들고 이를 겹치게 접촉시킨 후, 두 개의 작은 단심선재가 양쪽에 접촉되도록 접합하였다. 이렇게 만든 접합선재는 각각 MM-joint, MSM-joint, double-MSM-joint 라 이름 붙였다. 접합선재는 500에서 2500 MPa의 범위에서 일축가압하고  $840^\circ\text{C}$  대기분위기에서 50시간 재소결 처리를 하였다.

임계전류값(77K, self field)은  $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 4 단자법으로 측정하였다. 저항전이지수 ( $n$  값)는  $1\ \mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 5\ \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전계 범위에서 측정하였으며, 각각 조건에서 4~5개의 시편을 측정하였고, 미세조직은 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

## III. Results and Discussion

Fig. 2에 압력에 따른 접합선재의 통전율과 전압 탭의 위치를 표시하였다. 통전율 값은 비접합 영역의 임계전류값에 대한 접합부의 임계전류값의 비율,  $I_c(\text{a-f tap}) / I_c(\text{a-b or e-f taps})$ 로 정의하였다. 접합선재의 통전율 값은 접합방법에 따라 크게 의존 하는 것으로 나타났다. MM-joint의 경우 전체 단일축가압 영역에 걸쳐 24.8-29.0%의 값을 나타냈으며, MSM-joint와 double-MSM-joint의 경우 각각 24.8-53.9%와 63.4-76.0%의 값을 나타냈다. 이러한 MM-joint의 낮은 통전율은 단심선재 core의 단면적보다 다심선재 필라멘트의 단면적이 훨씬 더 작고, 또한 다심선재는 Ag sheath에 의해 각각의 필라멘트가 분리되어 있어 필라멘트 사이의 직접적인 연결이 제한되기 때문인 것으로 사료된다.

Double-MSM-joint의 경우는 가장 높은 통전율을 나타냈으며, 이는 단심선재의 통전율에 상응하는 값이다. Double-MSM-joint의 경우, 두 다심선재의 한쪽이 lap-joint로 접촉되고, 나머지 필라멘트는 두 개의 단심을 통해 다시 연결되기 때문에 core 사이의 접촉면적이 더욱 향상된다. 따라서, 다심선재의 초전류의 흐름이 더욱 원활해지고, 연결되지 못한 필라멘트의

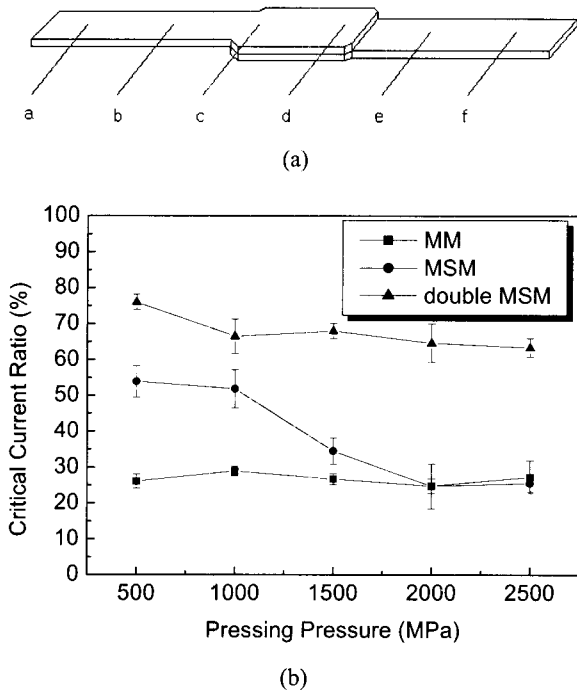


Fig. 2. (a) Locations of the voltage probe in the jointed tape and (b) dependence of critical current ratio of the jointed tapes on uniaxial pressure.

전류 흐름은 단심 core를 통하여 통과하며 이로 인해 통전율이 향상되는 것으로 사료된다.

MSM-joint에서는 1000 MPa에서부터 압력이 증가함에 따라서 53.9에서 25.5%로 점차 통전율은 감소되었다. 이는 가압력에 의한 불균일한 미세조직의 생성 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3은 단일축가압력에 따른  $n$  값의 변화를 보여준다. MM-joint, MSM-joint, double-MSM-joint 선재에 대한  $n$  값은 각각 2.5-2.8, 2.9-4.1, 3.5-5.1로 계산되었다. 접합선재의  $n$  값은 단심 필라멘트가 존재 함으로써 조금씩 증가하였고, double-MSM-joint 선재가 가장 높은 값을 나타내었다. 일반적으로  $n$  값은 원료분말과 제작공정 중의 오염, 결정립의 크기, 결정립의 배열, 결정립의 연결성 등과 같은 미세조직에 크게 의존하는 것으로 보고되고 있다[7]. 따라서, 비접합 선재에 대한(일반적으로 15~20) 접합선재의  $n$  값의 감소는 불균일한 미세조직의 생성과 필라멘트의 약한 연결성과 연관시켜 생각해 볼 수 있다.

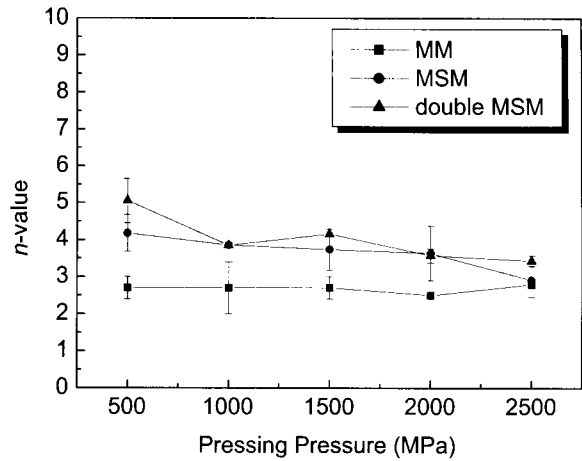
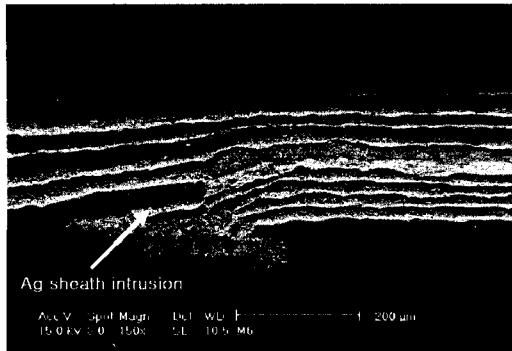


Fig. 3. Dependence of  $n$ -value of the jointed tapes on uniaxial pressure.

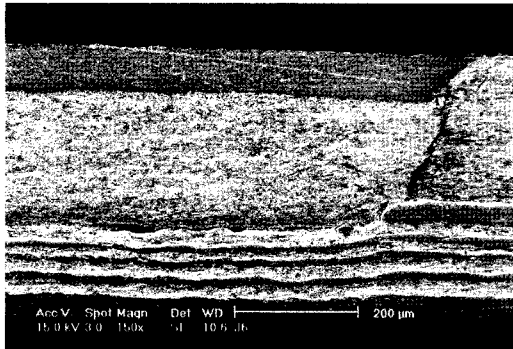
Fig. 4(a)는 MM-joint 선재의 길이방향의 단면을 나타냈다. 단일축가압 공정 중에 Ag sheath의 일부분(화살표)이 선재 내부로 침투하여 두 선재의 연결성에 나쁜 영향을 미치는 것으로 판단되며 또한, 두 선재의 한쪽 필라멘트들만이 접합면을 형성하고 있다. 접합부에서의 이러한 불균일한 미세조직이 MM-joint 선재의 통전율과  $n$  값 감소의 원인이 되는 것으로 판단된다.

이와는 반대로 MSM-joint 선재(fig. 4(b))의 미세조직은 단심선재의 core가 다심선재의 외부 필라멘트와 넓은 면적에 걸쳐 접합을 이루고 있으나, 단심 core 자체에서 crack이 발생하여 core의 debonding을 발생시키고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 crack의 크기와 발생빈도는 단일축가압력의 증가에 따라 더욱 더 커지는 것으로 관찰되었고, 이로 인해 가압력의 증가에 따라 통전율과  $n$  값이 감소하는 것으로 사료된다.

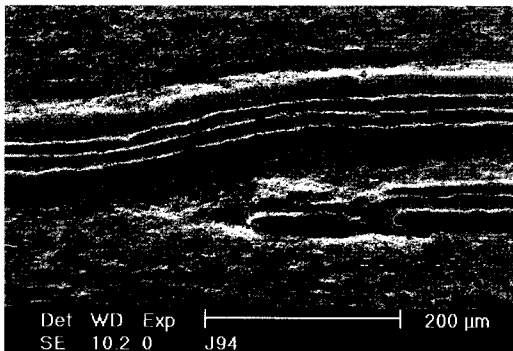
Fig. 4(c)는 double-MSM-joint의 사진으로, 두 다심선재는 lap-joint로 연결되어 있고, 아래 위의 외부 필라멘트들은 단심 core와 직접적으로 접합되고 있음을 볼 수 있다. 특히, 단심과 다심의 core는 MSM-joint와 비교하여 계면이 부드럽고 곧으며, crack이 거의 없음을 볼 수 있다. 따라서, double-MSM-joint의 가장 높은 통전율과  $n$  값은 우수한 연결성과 균일한 미세조직 때문임을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. SEM microstructures of joined region in (a) MM-, (b) MSM-, and (c) double-MSM-jointed tapes pressed at 1,000 MPa.

#### IV. Conclusions

본 실험에서는 BSCCO 다심 선재를 접합하고

전기적인 특성을 평가하였다. MM-joint에서 통전율과  $n$  값은 24.8-29.0%, 2.5-2.8로 나타났다. 이와는 반대로 MSM-joint 와 double-MSM-joint에서는 각각 24.8-29.0%, 2.9-4.1 과 63.4-76.0%, 3.5-5.1로 향상된 값을 나타내었다. Double-MSM-joint가 가장 좋은 특성은 단심 core가 넓은 면적에 걸쳐 두 다심 선재의 필라멘트와 접합되어 연결성을 향상시켜주기 때문인 것으로 판단된다.

#### Acknowledgment

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

#### References

- [1] T. Kiyoshi, K. Inoue, M. Kosuge, H. Wada, and H. Maeda, "Current decay evolution of closed HTS coil circuits," IEEE Trans. Appl. Supercond., 7, 877-880 (1997).
- [2] D. W. Hazelton, M. T. Gardner, J. M. Weloth, and J. A. Rice, "HTS Insert coils for ultra high field NMR spectroscopy," IEEE Trans. Appl. Supercond., 7, 885-888 (1997).
- [3] J. E. Tkaczyk et al., "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 Trans. Appl. Supercond., 3, 946-948 (1993).
- [4] T. Hase, K. Shibutani, S. Hayashi, M. Himada, and R. Ogawa, "Fabrication of superconductively jointed silver-sheathed Bi-2212 tape," Cryogenics. 36, 21-25 (1996).
- [5] J. H. Kim, K. T. Kim, J. Joo, and W. Nah, "A study on joining method of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O multifilamentary tape," EUCAS 2001 on Denmark (2001).
- [6] S. S. Oh, H. S. Ha, S. C. Kim, D. W. Ha, Y. K. Kwon, K. S. Ryu, and J. Joo, "Superconducting joint of reacted Bi-2223/Ag multi-filamentary tapes," IEEE Trans. Appl. Supercond., 11, 2998-3001 (2001)
- [7] P. Kovac, L. Cesnak, T. Melisek, I. Husek, and K. Frohlich, "Relation between critical current and exponent  $n$  in Bi(2223)/Ag tapes," Supercond. Sci. Technol., 10, 605-611 (1997).