

BSCCO(2223)/Ag 다심 초전도선재의 접합공정 개발

김규태, 김정호, 안혁, 장석현, 주진호
성균관대학교 금속재료공학부

Development of joining process of the BSCCO(2223)/Ag multi-filament tapes

Kyu Tae Kim, Jung Ho Kim, Jinho Joo, Hyuck An, and Seok Hern Jang
School of Metallurgical and Materials Engineering, Sungkyunkwan University

hotnews1@hanmail.net, jinho@skku.ac.kr

Abstract - We jointed Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O multifilament tapes and evaluated their electrical properties. In order to improve connectivity of multifilaments, single-filament tape was inserted between two multifilament tapes or multifilament was stepped by mechanical remove.

The critical current ratio(CCR) and n -value of the jointed tapes were evaluated as a function of uniaxial pressure. It was observed that CCR and n -value were 24.8-29.0% and 2.5-2.8 for lap-jointed tape. On the other hand, the corresponding values were improved to 51.8-61.9% and 2.9-5.1 for three stepped jointed tape, and 63.4-67.9% and 3.4-4.2 for double MSM lap-jointed tape, respectively. These improvements are to be due to better interconnection between filaments of two tapes.

1. 서 론

BSCCO(2223) 초전도체는 수 km급 장선의 제조가 가능하고, 높은 임계온도(T_c)와 임계전류밀도(J_c)를 가지므로 전력기기의 응용가능성이 높은 것으로 평가받고 있다. 미국 ASC사에서는 최근 77 K에서 임계전류값이 180 A 정도로 높은 BSCCO(2223) 선재를 개발하였고, 이를 이용하여 수 년 내에 송전케이블(power cable), 모터(motor), 발전기(generator), 한류기(current limiter), 변압기(transformer) 등 고온초전도 전력기기의 실용화가 가능할 것으로 보고하고 있다[1].

초전도 전력기기를 개발하기 위해서는 초전도 선재의 접합기술이 확립되어야 한다. 초전도 선재의 접합방법은 은 시스(Ag sheath)끼리 접합하는 상전도 접합방법이 간단하지만, 접합부의 접합저항이 매우 크다. 이와는 반대로 은 시스를 제거하고 초전도 코어(core)끼리 접합하는 초전도 접합방법은 과정이 복잡하고 재열처리에 의한 시간적 지연이 필요하지만 접합부의 접합저항이 10^{-12} Ω 이하로 매우 낮아 영구전류모드로 운행

되는 MRI 또는 NMR 마그네트(magnet)의 제작이 가능하다[2]. 그러나 BSCCO(2223) 초전도선재의 접합공정에 대한 연구는 아직 미비하고 주로 단심선재에 대한 접합방법만이 보고 되고 있다[3]. 다심선재 접합의 경우 단심선재의 접합과 달리 필라멘트(filament)간의 연결이 어려운 단점을 가지고 있어서 상대적으로 낮은 통전율을 가지며 30~50%의 통전율을 가지는 접합방법들이 보고되고 있다[4].

본 연구에서는 19심 다심선재 사이에 단심 초전도선재를 삽입하는 방법(multifilament-single filament-multifilament joint, 이하 MSM joint라 함)과 37심 다심선재에 스텝(step)을 내는 방법으로 접합선재를 제조하여 필라멘트의 연결성을 향상시키고자 하였다. 접합방법에 따른 최적 압력 변수, 통전율, n 값 변화에 대하여 연구하였으며, 이러한 접합부의 특성과 미세조직과의 연관성에 대하여 연구하였다.

2. 실험 방법

단심과 다심선재는 Bi-2223 분말의 조성이 $\text{Bi}_{1.80}(\text{Pb}_{0.33})\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_{2.00}\text{Cu}_{3.00}\text{O}_x$ 인 Merck 분말(Merck Co. Ltd)을 이용하여 powder-in-tube(PIT) 방법으로 제조하였다[5]. 초전도 선재의 접합은 lap-joint방법을 이용하였으며, 접촉될 부분만을 남기고 내식성이 강한 내 산화 테이프를 감싼 후 $\text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_3 = 1 : 1$ 인 부식액을 사용하여 접촉될 부분의 은 시스(Ag sheath)를 제거 시켰다. 접합 선재는 총 다섯 가지의 접합방법을 이용하였으며 그림 1에 접합방법의 모식도를 나타내었다.

두 다심선재의 은 시스만을 제거하고 단순히 접합한 시편을 lap-joint시편, 그리고 다심선재 사이에 단심선재를 위치시켜 접합한 시편을 MSM(multifilament - single filament - multifilament) joint로 명하고 단심선재가 접합부의 위, 아래에 위치할 경우 double MSM으로 표기하였다. 마지막으로 필라멘트에 스텝을 만든 시편은 스텝의 개수에 따라 1 stepped lap-joint, 3 stepped lap-joint라고 명하였다. MSM lap-joint

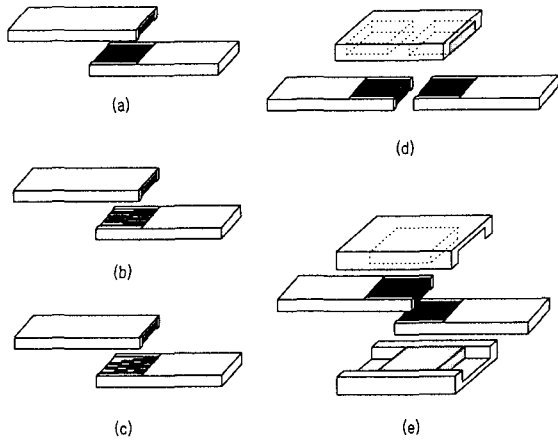


Fig. 1. Schematic of the multifilamentary jointed tapes of (a) lap-, (b) 1 stepped lap-, (c) 3 stepped lap-, (d) MSM, (e) double MSM lap-joint

시편은 다심선재와 단심선재의 은 시스 한쪽 면을 같은 크기로 제거하고 노출된 초전도심을 접촉시켰다. Double MSM lap-joint 방법에서는 먼저 다심선재를 lap-joint 시키고 단심선재는 겹쳐진 다심선재의 아래위로 접촉시켰다. Stepped lap-joint 시편은 각각 한 개와 세 개 층의 초전도 코어를 기계적으로 제거한 후 노출된 초전도심을 접촉시켰다. 다섯 종류의 접합 시편들은 접촉 부분만을 500 MPa부터 2,500 MPa 까지 500 MPa 단위로 각 압력마다 3~5개의 시편을 단일축가압 후 840°C에서 50 시간 재소결처리 하였다.

임계전류값은 77 K, 0 T, 1 $\mu\text{N}/\text{cm}$ 를 기준으로 하여 4-단자법(four-probe method)으로 측정하였다. 통전율(critical current ratio)은 그림 2에서와 같이 비접합부의 임계전류값에 대한 접합부의 임계전류값의 비율 즉, $(I_{a-f}/I_{a-b}) \times 100$ 또는 $(I_{a-f}/I_{e-f}) \times 100$ 으로 나타내었다. 저항전이지수(n 값)는 $V = k I^n$ 으로부터 1 $\mu\text{N}/\text{cm} \leq E \leq 5 \mu\text{N}/\text{cm}$ 의 전계범위에서 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

19심, 37심 다심 비접합선재의 임계전류값과 n 값은 19심의 경우 15.0 A, 17.0, 37심의 경우 33.1 A, 15.7로 평가되었으며 단면 사진으로부터 은비(Ag-ratio)는 각각 2.6, 2.2로 계산되었다. 다심선재의 접합을 위해 삽입되는 단심선재는 임계전류값과 n 값이 각각 20.5 A, 20.2인 특성을 갖는 선재가 이용되었다.

다섯 가지 방법으로 접합한 시편의 통전율과 n

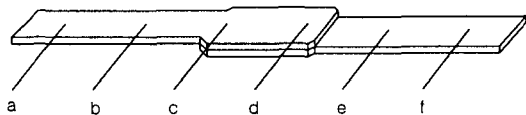
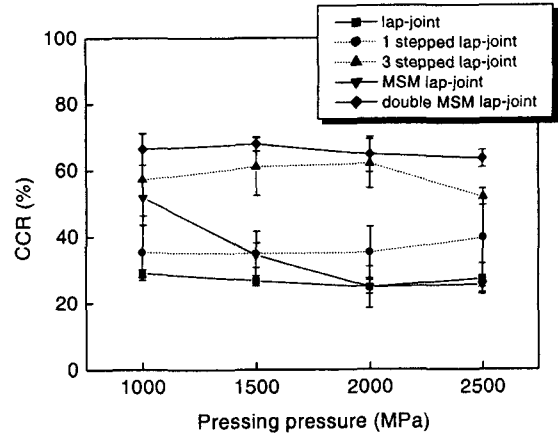
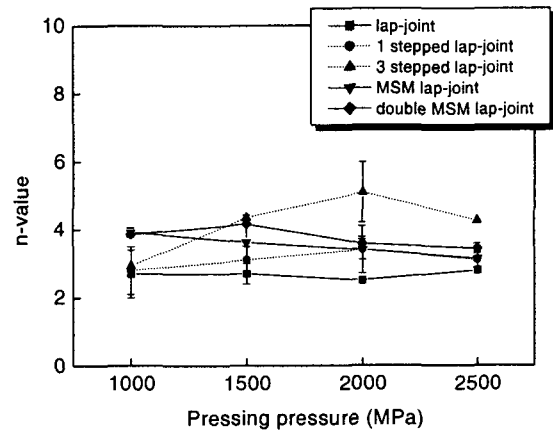


Fig. 2. Locations of the voltage probe in the jointed tape



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Critical current ratio and (b) n -value of the jointed tapes as a function of pressing pressure

값을 그림 3에 나타내었다. 그림 3(a)에서와 같이 lap-, MSM, double MSM lap-, 1 stepped lap-, 3 stepped lap-joint 선재에서 통전율은 가압범위에 따라 각각 24.8-29.0%, 24.7-51.8%, 63.4-67.9%, 35.0-39.5%, 51.8-61.1%로 나타났다. 접합방법에 따라 통전율은 큰 변화를 보이며 lap-joint 인 경우 가장 낮은 통전율을 가지고 압력에 따라 큰 변화가 없었다. 이러한 결과는 lap-joint 방법은 다심 필라멘트간의 연결이 정확히 이루어지지 않았으며 압력이 가해지더라도 연결성이 향상되지 않기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 19개의 필라멘트 중 그림 4의 모식도에서 보듯이 부식 처리 후 노출될 수 있는 1-9까지의 9개 필라멘트들만이 접합에 참여하게 되며 개개의 필라멘트들이 균일하게 접촉되기가 용이하지 않을 것으로 판단된다.

반면에 MSM joint에서는 통전율이 51.8%로 향상된 값을 보이며 double MSM lap-joint는 최대 67.9%로 가장 우수한 통전율을 나타냈다.

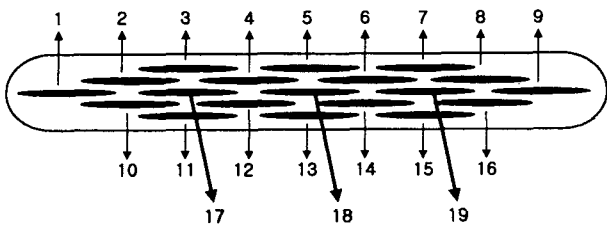


Fig. 4. Schematic diagram of the rolled 19 filamentary tape

MSM lap-joint의 경우 lap-joint와 마찬가지로 다심 필라멘트 중 9개만이 연결에 참여하지만 단심선재에 있는 하나의 큰 필라멘트를 매개로 하여 연결되므로 접합에 참여하는 필라멘트의 연결성이 상대적으로 향상되기 때문인 것으로 생각된다. Double MSM lap-joint의 경우 그림 4에서와 같이 세 개의 내부 필라멘트 (17, 18, 19)를 제외한 나머지 16개의 필라멘트가 모두 직 간접적으로 접합을 이루며, 다심선재 자체의 직접적인 접합 또한 통전율을 향상시키는 이유로 생각된다.

37심 선재의 경우 19심과 비교하여 외부의 은 시스만을 제거하면 단심선재를 아래위로 삽입하여도 접합에 참여하지 않는 내부 필라멘트의 개수가 상대적으로 많아지므로 기계적으로 스텝을 내는 방법을 이용하였다. 통전율은 1 stepped lap-joint와 3 stepped lap-joint 시편에서 각각 39.5%, 61.1%로 향상되었으며 이는 스텝의 증가에 따라 접합에 참여하는 필라멘트의 개수의 증가에 기인한 것으로 사료된다.

그림 3(b)는 네 종류의 접합시편에서 압력에 따른 n 값을 나타낸 그래프이다. lap-, MSM, double MSM lap-, 1 stepped lap-, 3 stepped lap-joint 선재에서 n 값은 압력에 따라 각각 2.5-2.8, 3.1-3.9, 3.4-4.2, 2.8-3.4, 2.9-5.1로 평가되었다. 전반적으로 n 값은 비접합선재 (17.0)에 비하여 상당히 감소되었으며, 단심을 이용한 경우와 접합부에 step을 만들어 접합한 경우 모두 단순히 다심끼리 접합한 lap-joint 보다는 향상된 결과를 나타내었다. 그림에서 보듯이 접합방법에 따른 n 값의 변화추이는 통전율의 변화와 유사함을 알 수 있었다. 즉 접합에 참여하는 필라멘트의 개수가 증가하는 경우가 lap-joint 보다 더 높은 값을 가진다.

일반적으로 n 값은 불순물, 결정립의 크기와 배열, 그리고 결정립의 연결성 등과 같은 미세조직에 의존한다고 보고 되고 있다[6]. 그러므로 접합선재에서의 낮은 n 값은 접합부에서의 불균일한 미세조직과 필라멘트들의 불완전한 연결에 의한 것으로 사료된다. Double MSM lap-joint 방법은 높은 통전율을 가지나 MRI, NMR 등의 기기에서 초전도 마그네트와 영구전류스위치간의 연결 등에 응용되기 위해서는 n 값이 더욱 향상되어야 할 것이다.

4. 결 론

Bi-2223 초전도 다심선재를 접합하고 전기적 특성을 평가하였다. 다심 선재의 접합공정의 가장 큰 어려움인 필라멘트의 연결성을 향상시키기 위해 두 개의 다심선재를 단심선재로 연결하는 방법과 필라멘트에 스텝을 내는 방법을 사용하였다.

단순히 외부 은 시스만을 제거하여 접합한 lap-joint 선재는 통전율 29.0%, n 값 2.8로 가장 낮은 전기적 특성을 나타냈으며, 3개의 스텝을 내거나 두 개의 단심선재를 이용한 경우 모두 통전율은 두 배 이상, n 값은 1.5배 정도 증가하였다. 이는 두 가지 방법 모두 접합에 참여하는 필라멘트의 개수가 훨씬 많아 다심선재의 접합에서 가장 문제가 되는 필라멘트의 연결성을 향상시키기 때문인 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. B. Huang, X. Y. Cai, T. Holesinger, V. A. Maroni, D. Yu, R. Parrella, M. Rupich, E. Hellstrom, M. Teplitsky, K. Venkataraman and D. Larbalestier, "Improving the Critical Current Density in Bi-2223 Wires Via a Reduction of the Secondary Phase Content", presented at ASC 2002, Houston USA, Aug. 4-9, 2002
- [2] K. Fukushima, M. Okada, J. Sato, T. Kiyoshi, H. Kumakura, K. Togano, and H. Wada, "Persistent mode operation of Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O_x/Ag stacked double pancake coils with superconducting joints", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 36, pp. L1433-1435, 1997
- [3] J. E. Tkaczyk et al., "Superconducting joints formed between powder-in-tube Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_z/Ag tapes", IEEE Trans. Appl. Supercon., vol. 3, pp. 946-948, 1993
- [4] 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
- [5] K. T. Kim, J. H. Kim, Jinho Joo, Philip Nash, "Superconducting Joint of Multifilamentary Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O Tape", Applied Superconductivity Conference ASC 2002, Houston, USA, 2002
- [6] 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., vol. 10, pp. 605, 1997

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