

BSCCO(2223) 단심 초전도 선재를 이용한 다심 초전도 선재의 접합공정 연구

Superconducting Joint of Multi-filament BSCCO(2223) Tapes by using Single-filament Tape

김규태*, 김정호*, 장석현*, 주진호*, 강형구**, 고태국**, 하홍수***, 오상수***
(Kyu Tae Kim*, Jung Ho Kim*, Seok Hern Jang*, Jin Ho Joo*, Hyoung Ku Kang**,
Tae Kuk Ko**, Hong Soo Ha***, and Sang Soo Oh***)

Abstract

We jointed Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O multifilament tapes and evaluated their electrical and mechanical properties. In order to improve connectivity of multifilaments, one or two single-filament tape was inserted between two multifilament tapes. The critical current ratio(CCR) and n -value of the jointed tapes were evaluated as a function of uniaxial pressure. It was observed that critical current ratio and n -value were 24.8-29.0% and 2.5-2.8 for MM lap-jointed tape. On the other hand, the corresponding values were improved to 24.7-53.9% and 3.1-4.2 for MSM jointed tape, and 63.4-76.0% and 3.4-5.1 for double MSM lap-jointed tape, respectively. The highest electrical properties of double MSM lap-jointed tape are considered to be owing to the presence of single core, causing better interconnections of multifilaments between the two tapes.

The mechanical property of jointed tape was evaluated and correlated to the microstructural evolution. The strength of jointed tapes was 44-64% less than that of the unjoined tape. The strain tolerance of jointed tape was also reduced compared to that of the unjoined tape. These lower mechanical properties of jointed tape are probably due to the induced nonuniform microstructure such as the existence of cracks and Ag-intrusion in the jointed region.

Key Words : Critical current ratio(CCR), N-value, Superconducting joint

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 AMSC사에서는 최근 77 K에서 임계전류값이 180 A 정도로 높은 BSCCO(2223) 선재를 개발하였고, 이를 이용하여 수 년 내에 송전케이블, 모터, 발전기(generator), 환류기(current limiter), 변압기(transformer) 등 고온초전도 전력기기의 실용화가 가능할 것으로 보고하고 있다[1].

초전도 전력기기를 개발하기 위해서는 초전도선재의 접합이 필요하며, 접합부에서의 불균일한 미세조직과 저항에 의해 통전특성과 기계적 특성이 감소되는 현상을 제어 할 수 있어야 한다. 특히 MRI(magnetic resonance image), NMR(nuclear

* : 성균관대학교 신소재공학과
(경기도 수원시 장안구 천전동 300,
Fax : 031-290-7371,
Corresponding Author : jinho@skku.edu)

** : 연세대학교 전기전자공학과

*** : 한국전기연구원 초전도응용연구사업팀
2003년 1월 27일 접수, 2003년 4월 28일 1차 심사완료,
2003년 5월 15일 최종 심사완료

magnetic resonance) 용 마그네트는 자장의 안정성과 균일성 유지를 위하여 영구전류모드(persistent current mode)로 운행되어야 하며 영구전류모드는 10^{-11} Ω 이하의 접합저항을 가지는 접합방법이 요구되고 있다[2,3]. 그러나 BSCCO(2223) 초전도선재의 접합공정에 대한 연구는 아직 미비하고 주로 단심선재에 대한 접합방법만이 보고되고 있다[4,5]. 다심선재 접합의 경우 단심선재의 접합과 달리 필라멘트(filament)간의 연결이 어려운 단점을 가지고 있어서 상대적으로 낮은 통전율을 갖는다. 다심선재의 접합은 30-50%의 통전율(critical current ratio)을 가지는 결과들이 보고되고 있고, Kim 등은 필라멘트의 연결성 향상을 위하여 접합부에 step을 내는 방법을 이용하여 최대 58%의 통전율을 보였다[5,6]. 그러나 실제 적용을 위해서는 더 높은 전기적, 기계적 특성을 가지는 접합방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 19심 다심선재 사이에 단심 초전도선재를 삽입하는 방법(multifilament-single filament-multifilament joint, 이하 MSM joint라 함)으로 접합선재를 제조하여 필라멘트의 연결성을 향상시키고자 하였다. 접합방법에 따른 최적 압력변수, 통전율, n 값 변화에 대하여 연구하였으며, 이러한 접합부의 특성과 미세조직과의 연관성에 대하여 연구하였다. 또한 최적의 특성을 갖는 접합선재의 접합강도와 인장변형특성을 평가하였다.

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. 먼저 분말을 외경 8 mm 내경 6 mm인 은 튜브(Ag tube)에 충전시킨 후 단면 감소율 10%로 해서 직경 2.0 mm까지 인발하였다. 단심선재의 제조는 두께 감소율 10%로 600 μm 까지 압연하고 840°C 대기 분위기에서 50 시간 1차 열처리를 하였다. 이후 최종 500 μm 까지 다시 압연한 후 840°C 대기 분위기에서 50 시간 2차 열처리를 하였다. 다심선재의 제조는 2.0 mm까지 인발이 끝난 시편을 다시 최종 육각인발 하고 19개로 절단하여 대구경의 은 튜브(외경 10 mm, 내경 8 mm)에 삽입 후 재인발 하였다. 재인발한 선재는 두께 300 μm 까지 압연과정을 거치고 840°C 대기분위기에서 50 시간 1차 열처리 후 최종 두께 250 μm

로 재압연하고 다시 840°C 대기분위기에서 50 시간 2차 열처리를 하였다.

초전도 선재의 접합은 lap-joint방법과 butt-joint 방법을 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 제거시켰다. 접합선재는 총 네 가지의 접합방법을 이용하였으며 그림 1에 접합방법의 모식도를 나타내었다. 두 개의 다심선재를 lap-joint 방법으로 접합한 시편은 MM(multifilament-multifilament) joint, 다심선재 사이에 단심선재를 위치시켜 접합한 시편을 MSM(multifilament-single filament-multifilament) joint로 명하였다. 또한 다심선재의 접합형태에 따라 lap-, butt-joint, 단심선재가 접합부의 위, 아래에 위치할 경우 double MSM으로 표기하였다. MSM 시편(그림 1(b))은 다심선재와 단심선재의 은 시스 한쪽 면을 접촉면이 잘 일치 되도록 같은 크기(10 mm × 2.2 mm)로 제거하고 노출된 초전도심을 접촉시켰다. Double MSM lap-joint 방법에서는 먼저 다심선재를 lap-joint 시키고 단심선재는 30 mm 길이의 드러난 초전도심 양쪽 끝 2.5 mm 부분을 칼로 제거하여 25 mm의 초전도심만 남긴 후 접촉시켰다. 네 종류의 접합 시편들은 접촉 부분만을

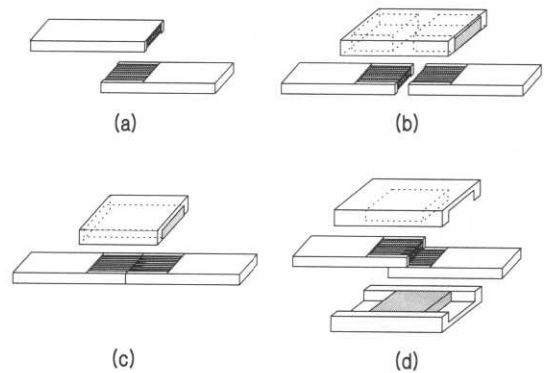


그림 1. (a) MM lap-, (b) MSM, (c) MSM butt-, and (d) double MSM lap-joint의 접합방법 모식도.

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

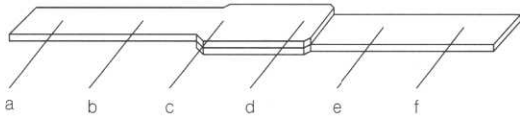


그림 2. 접합선재에서 전압단자의 위치.
 Fig. 2. Locations of the voltage probe in the jointed tape.

500 MPa부터 2,500 MPa 까지 500 MPa 단위로 각 압력마다 3~5개의 시편을 단일축가압 후 840℃에서 50 시간 재소결처리 하였다.

임계전류값은 77 K, 0 T, 1 μV/cm를 기준으로 하여 4-단자법(four-probe method)으로 측정하였다. 통전율(critical current ratio)은 그림 2에서와 같이 비접합부의 임계전류값에 대한 접합부의 임계전류값의 비율 즉, $(I_{a-t}/I_{a-b}) \times 100$ 또는 $(I_{a-t}/I_{e-t}) \times 100$ 으로 나타내었다. 저항전이 지수(n 값)는 $V = kI^n$ 으로부터 $1 \mu V/cm \leq E \leq 5 \mu V/cm$ 의 전계범위에서 평가하였다. 접합선재의 접합강도는 만능시험기(Instron-5655)를 이용하여 측정하였다. 저온에서의 변형에 따른 접합선재와 비접합선재의 임계전류값 변화는 그림 3에서와 같이 U-자형 치구를 이용하여 측정하였다. 미세조직관찰은 광학현미경(optical microscope)과 SEM(scanning electron microscope)을 이용하였다.

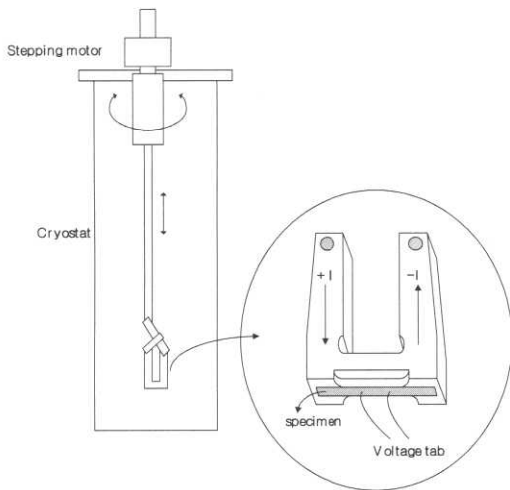


그림 3. 저온인장변형특성 측정에 사용된 U자형 치구의 개략도.
 Fig. 3. The set-up scheme for U-shaped device used for I_c -tension measurement device.



(a)

Number of filaments	19
Thickness	0.25 mm
Width	3.1 mm
Critical current	15 A
n -value	17.0
Ag-ratio	2.56

(b)

그림 4. 19심 다심선재의 (a) 횡측단면사진과 (b) 시편의 제원.

Fig. 4. (a) Micrograph of the transverse cross-section of the 19 multifilament tape and (b) specifications of the unjoined tape.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기적 특성

그림 4에 19심 다심 비접합선재의 횡측단면사진과 기본적인 특성을 표로 나타내었다. 임계전류값은 15 A, n 값은 17.0으로 평가되었으며 단면 사진으로부터 은비(Ag-ratio)는 2.56으로 계산되었다. 다심선재의 접합을 위해 삽입되는 단심선재는 임계전류값과 n 값이 각각 20.5 A, 20.2인 특성을 갖는 선재가 이용되었다.

네 가지 방법으로 접합한 시편의 통전율과 n 값을 그림 5에 나타내었다. 그림 5(a)에서와 같이 MM lap-, MSM, MSM butt-, double MSM lap-joint 선재에서 통전율은 가압범위에 따라 각각 24.8-29.0%, 24.7-53.9%, 30.5-49.2%, 63.4-76.0%로 나타났다. 접합방법에 따라 통전율은 큰 변화를 보이며 MM lap-joint 인 경우 가장 낮은 통전율을 가지고 압력에 따라 큰 변화가 없었다. 이러한 결과는 MM lap-joint 방법은 다심 필라멘트간의 연결이 정확히 이루어지지 않았으며 압력이 가해지더라도 연결성이 향상되지 않기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 19개의 필라멘트 중 그림 6의 모식도에서 보듯이 부식 처리 후 노출될 수 있는 1-9까지의 9개 필라멘트들만이 접합에 참여하게 되며 개개의 필라멘트들이 균일하게 접촉되기 어렵지 않을 것으로 판단된다. 반면에

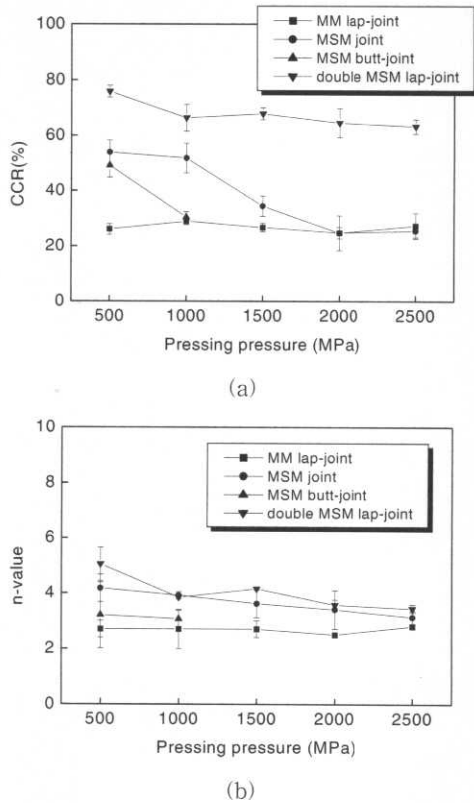


그림 5. MM lap-, MSM, MSM butt-, double MSM lap-jointed 선재의 (a) 통전율과 (b) n 값.

Fig. 5. (a) Critical current ratio and (b) n -value of MM lap-, MSM, MSM butt-, and double MSM lap-jointed tapes.

MSM joint에서는 통전율이 24.7-53.9%로 향상된 값을 보이며 이는 MM lap-joint와 마찬가지로 다심 필라멘트 중 9개만이 연결에 참여하지만 단심 선재에 있는 하나의 큰 필라멘트를 매개로 하여 연결되므로 접합에 참여하는 필라멘트의 연결성이 상대적으로 향상되기 때문인 것으로 생각된다.

MSM butt-joint는 500 MPa에서 최대 49.2%의 통전율을 나타냈으며, 1,000 MPa 이상의 압력에서는 통전율이 급격히 감소하였다. MSM butt-joint 방법의 경우 MSM joint 방법으로 인한 필라멘트의 연결성 향상과 더불어 다심선재 자체의 접합 효과를 기대하였으나 선재의 횡단면에서 필라멘트의 접합 면적이 작고 또 정확한 필라멘트의 연결이 이루어지지 않아 MSM joint의 결과와 비슷한 결

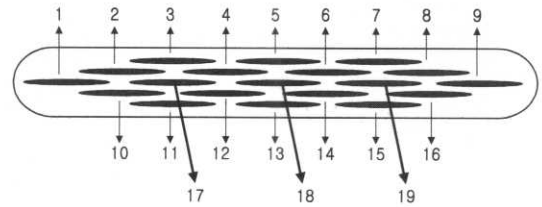


그림 6. 압연된 19심 다심선재의 횡측단면 모식도.
Fig. 6. Schematic diagram of the rolled 19 filamentary tape.

과를 나타낸 것으로 사료된다. Double MSM lap-joint는 최대 76.0%로 가장 우수한 통전율을 나타냈다. 이러한 결과는 단심선재에 의한 연결성 향상과, 다심선재 자체의 직접적인 접합, 그리고 접합에 참여하는 다심 필라멘트의 개수의 증가에 기인한 것으로 생각된다. 그림 6에서와 같이 double MSM lap-joint 방법에서는 세 개의 내부 필라멘트 (17, 18, 19)를 제외한 나머지 16개의 필라멘트가 모두 직 간접적으로 접합을 이루는 형태가 된다.

그림 5(b)는 네 종류의 접합시편에서 압력에 따른 n 값을 나타낸 그래프이다. MM lap-, MSM, MSM butt-, double MSM lap-joint 선재에서 n 값은 압력에 따라 각각 2.5-2.8, 3.1-4.2, 3.1-3.2, 3.4-5.1로 평가되었다. 전반적으로 n 값은 비접합 선재 (17.0)에 비하여 상당히 감소되었으며, 접합부에 step을 만들어 접합한 37심 다심 접합선재의 연구에서 측정된 값과 유사한 결과이다[6-7]. 그림에서 보듯이 접합방법에 따른 n 값의 변화추이는 통전율의 변화와 유사함을 알 수 있었다. 즉 단심 선재를 매개로 하여 다심선재를 연결한 경우가 MM lap-joint 보다 더 높은 값을 가지며 double MSM lap-jointed 선재에서는 가장 높은 n 값을 가진다.

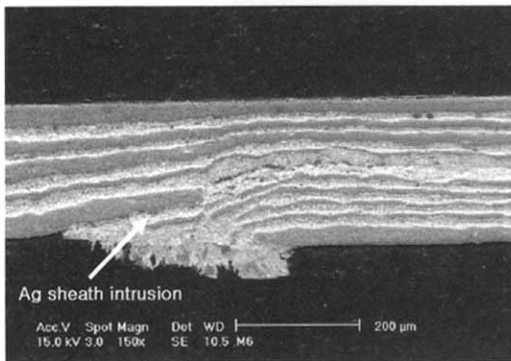
일반적으로 n 값은 불순물, 결정립의 크기와 배열, 그리고 결정립의 연결성 등과 같은 미세조직에 의존한다고 보고 되고 있다[8]. 그러므로 접합선재에서의 낮은 n 값은 접합부에서의 불균일한 미세조직과 필라멘트들의 불완전한 연결에 의한 것으로 사료된다[9-10]. Double MSM lap-joint 방법은 높은 통전율을 가지나 MRI, NMR 등의 기기에서 초전도 마그네트와 영구전류스위치간의 연결 등에 응용되기 위해서는 n 값이 더욱 향상되어야 할 것이다.

그림 7에 접합영역의 종단면 미세조직 사진을

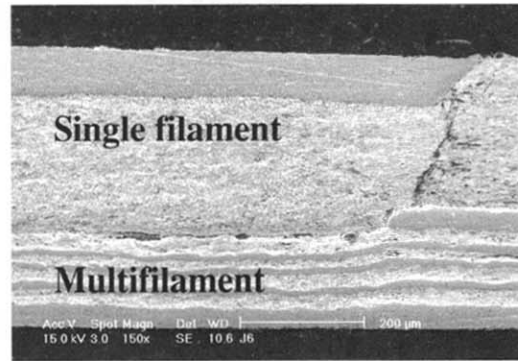
나타내었다. 그림 7(a)에서 보듯이 MM lap-joint 선재는 은 시스가 제거된 한쪽면의 외부 초전도 심들만이 접합에 참여하고 있음을 알 수 있다. 또한 접합부에서 은 시스가 침입하여(화살표참조) 접합부의 미세조직을 불균일하게 변형시키고 필라멘트의 연결성을 저하시키고 있다. 접합부에서의 이러한 현상들이 접합선재의 임계특성을 감소시키는 것으로 판단된다. MSM joint 선재인 경우 그림 7(b)에서와 같이 단심 필라멘트가 다심 선재의 외부 필라멘트와 넓은 영역에서 연결되어 있음을 알 수 있다. 그러나 1,000 MPa 이상의 압력에서는 단심 선재와 다심선재가 만나는 전이영역(transition) 부분에서 두꺼운 단심선재에 crack이 발생하고, 부분적으로 단심선재와 다심선재의 변형 차이에 의해 debonding 되는 등 불균일한 미세조직이 형성되는

것을 알 수 있다. 실제 더 높은 압력에서 더 많은 crack과 debonding이 관찰되었으며 이로 인해 1,000 MPa 이상의 압력에서는 통전율이 감소하는 것으로 생각된다.

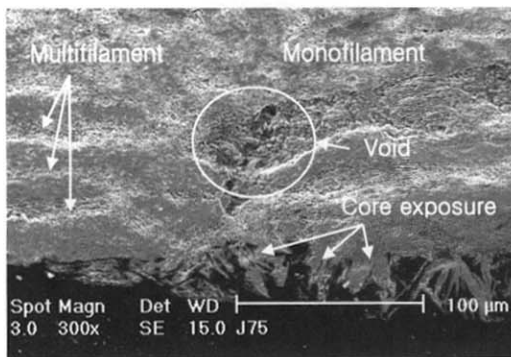
MSM butt-joint 선재는 그림 7(c)에서와 같이 다심선재와 다심선재가 만나는 끝 부분에 필라멘트들이 불균일하게 변형되어 있음을 관찰할 수 있다. 특히 연결부에 많은 void가 형성되어 있으며 이로 인해 필라멘트의 연결성이 감소되었다. 그리고 접합부에서 초전도심의 외부 노출이 더 심해져 액화질소의 침투에 의한 초전도 심의 손상이나 미세한 이물질의 침입 등의 원인이 되는 것으로 사료된다. Double MSM lap-joint 접합선재의 경우 그림 7(d)에서와 같이 두개의 다심선재가 lap-joint 되어 있으며 두개의 단심 코어가 접합부의 아래



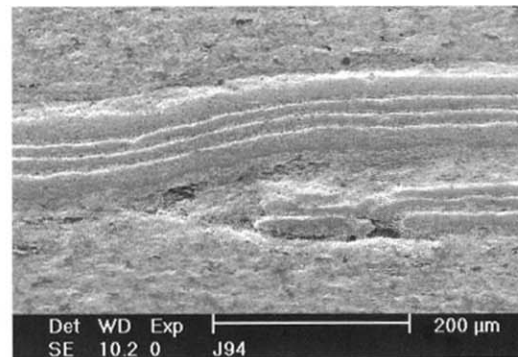
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7. (a) MM lap-, (b) MSM, (c) MSM butt-, and (d) double MSM lap-joint 선재의 종축단면 SEM 미세조직 사진.

Fig. 7. SEM micrograph of longitudinal cross-section of the (a) MM lap-, (b) MSM, (c) MSM butt-, and (d) double MSM lap-jointed tape.

위에 위치하고 있다. 다심 선재의 양면 시스를 제거하여 모든 외부 필라멘트들이 단심 코어와 연결되어 있으므로 MSM joint의 경우보다 필라멘트들의 연결성이 향상되었으며 이로 인해 우수한 임계특성을 보이는 것으로 판단된다. 특히 계면이 균일하며 불균일한 변형에 의한 debonding과 crack의 상대적으로 훨씬 줄어들었음을 확인할 수 있다.

이상의 접합방법들로부터 전기적 특성의 저하를 가져오는 영향인자는 다음과 같이 정리 할 수 있다. 첫째, 접합에 참여하는 다심 필라멘트의 수가 작을수록 통전율이 감소한다. 둘째, 단심선재와 다심선재의 변형 차이로 인한 접합부의 불균일성이 클수록 통전율이 감소한다. 즉, 접합부에서의 초전도심의 crack, debonding, 그리고 초전도심이 외부로 노출되는 현상 등은 통전율을 감소시키는 요인이 된다. 셋째, 단심선재를 매개로 하여 다심선재를 접합하는 경우에도 다심 필라멘트 간의 직접적인 접촉이 있으면 통전율이 향상된다. 또한 단심선재의 임계특성도 중요한 인자로 고려되어야 할 것이다. 현재 상업적으로 판매되고 있는 우수한 특성의 Bi-2223 초전도선재는 임계전류값이 100 A 이상으로 매우 높다. 만일 MSM joint에 사용되는 단심선재의 임계전류값이 이보다 훨씬 낮다면 접합선재의 통전율이 단심선재의 임계전류값에 의존하여 감소하게 되므로 접합방법에서 다심선재의 직접적인 연결이 반드시 필요하다. 이상의 결과들로부터 double MSM lap-joint 방법이 응용가능성이 높은 접합 방법인 것으로 사료된다.

3.2 기계적 특성

접합선재에서 기계적 특성을 평가하기 위하여 비접합선재와 접합선재의 강도값을 측정하였다. 비접합선재의 인장강도는 72.7 MPa로 측정되었고, MM lap-joint, MSM joint, double MSM lap-joint 접합선재에 대해 각각 43.0, 33.5, 48.5 MPa로 나타났다. 접합선재의 접합강도 값은 비접합선재 강도값의 44~64%로 낮은 값이며 이는 접합선재의 불균일한 변형에 의한 것으로 사료된다. 즉, 접합부에 형성된 crack, 불규칙한 접합계면, 은 시스의 침입으로 인한 불균일한 조직 등이 응력집중(stress concentration) 부분으로 작용하여 접합부에서 더 많은 crack의 발생과 전과가 이루어지고 이로 인해 접합강도가 낮게 되는 결과를 가져오게 된다. 그림 8은 인장실험 후 파단된 사진이며 전이영역에서 파괴가 일어났음을 보여준다. 기계적으로 가장 약한 부분은 접합부의 끝부분으로써 다심과

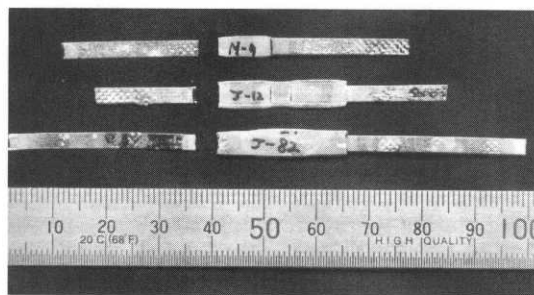


그림 8. 접합선재의 파단사진.

Fig. 8. Optical micrograph of the fractured jointed tapes.

다심, 또는 다심과 단심이 만나는 전이영역에서 파괴되었다.

마그네트의 형태로 감겨진 초전도체가 저온에서 실제 운행 시에는 self-field에 의한 hoop stress 또는 열응력에 의한 변형을 받게 된다. 이는 초전도선재의 미세 변형을 가져오게 되며, Ag sheath와 세라믹의 복합체로 되어있는 선재에서는 통전특성의 저하를 가져오게 된다. 그림 9는 비접합선재와 double MSM lap-joint 접합선재의 저온 변형에 따른 통전율의 변화를 변형되기 전의 임계전류값의 비(I_c/I_{c0})로 나타냈다.

비접합선재의 경우 0.4%까지의 변형률에서는 초기 임계전류값의 감소가 완만하며 통전특성이

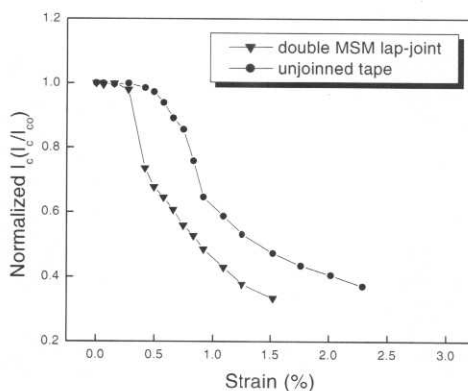


그림 9. Double MSM lap-joint 선재와 비접합선재의 변형률에 따른 $I_c(I_c0)$ 의 변화.

Fig. 9. Variations of normalized $I_c(I_{c0})$ with strain for double MSM lap-joint and unjoined tapes.

98.5% 유지되었으며, 이후 급격히 감소하여 1.0, 1.5%의 변형률에서는 임계전류값이 58.7, 47.3%로 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 이와는 대조적으로 double MSM lap-joint 접합 선재의 경우는 0.29%의 변형률까지 임계특성이 완만하게 감소(98.0%)하며 이후 급격하게 통전율이 떨어지는 결과를 나타냈다. 즉 1.0, 1.5%의 변형률에서는 42.9, 33.4%로 임계전류값이 비접합선재에 비하여 상대적으로 더 낮게 평가되어 변형률내성(strain tolerance)이 감소하였다. 이러한 결과는 이전에 언급하였듯이 접합부에서의 불균일한 변형에 의한 조직 손상에 기인하는 것으로 판단된다.



그림 10. Double MSM lap-joint 선재의 버블링 현상.

Fig. 10. Optical micrograph showing the bubbling of double MSM lap-jointed tape.

접합선재를 액체 질소 내에서 통전 시킨 후 상온으로 이동시켜 온도가 증가될 때 일부 시편에서 그림 10과 같이 은 시스가 부풀어 오르는 버블링(bubbling) 현상이 관찰되었다. 일반적으로 버블링 현상은 열처리 시에 발생하는데 이는 주로 분말의 carbon 성분 또는 joule 열에 의한 것으로 초전도체의 전기적, 기계적 특성을 저하시키는 요인이 된다[11,12]. 접합선재에서의 버블링 현상은 접합부 끝단의 전이영역부분에서 노출된 초전도심으로 액체 질소가 침투하는 현상에 의한 것으로 사료된다. 접합선재를 액체 질소에 넣으면 초전도심이 노출된 부분으로 액체 질소가 침투하고, 상온으로 급격하게 온도가 변하게 되면 액체 질소가 국부지역에 갇혀 기화되면서 버블링이 발생할 수 있다[4]. 그러므로 접합공정시 접합부에서 초전도심이 노출되지 않도록 하여야 하며, 접합부 양 끝단의 형태를 조절하거나 은 막(Ag foil)으로 감싸줌으로써 방지할 수 있다.

4. 결 론

Bi-2223 초전도 다심선재를 접합하고 전기적 및

기계적 특성을 평가하였다. 다심 선재의 접합공정의 가장 큰 어려움인 필라멘트의 연결성을 향상시키기 위해 두 개의 다심선재를 단심선재로 연결하는 방법을 사용하였다.

MM lap-joint 선재는 통전율 29.0%, n 값 2.8로 가장 낮은 전기적 특성을 나타냈으며, MSM butt-joint, MSM joint, double MSM lap-joint 순으로 임계특성이 향상되었다. 가장 우수한 전기적 특성을 가지는 double MSM lap-joint에서는 통전율과 n -값이 각각 76.0%와 5.1로 나타났다. 이는 다심선재의 직접적인 접합뿐만 아니라 두 개의 단심선재를 사용함으로써 두 다심선재 사이의 필라멘트의 연결성이 증가하고 접합부의 불균일한 미세조직이 감소하였기 때문으로 사료된다.

접합선재의 강도는 비접합선재에 비하여 44~64%의 낮은 값을 나타내었으며 저온변형에 따른 통전율의 변화를 측정된 결과 double MSM-lap joint 선재는 비접합선재에 비하여 변형률내성이 감소하였다. 접합선재에서 기계적 특성의 감소는 접합부에 형성된 crack, 불규칙한 접합계면, 은 시스의 침입으로 인한 불균일한 조직 등이 응력집중부로 작용하기 때문인 것으로 생각된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [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 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_x/\text{Ag}$ stacked double pancake coils with superconducting joints", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, p. L1433, 1997.

- [3] 김정호, 지봉기, 박형상, 임준형, 오승진, 주진호, 황보훈, 나완수, "Bi-2223 초전도선재의 상전도- 및 초전도-접합부 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 13권, 3호, p. 247, 2000.
- [4] J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, P. J. Bednarczyk, M. F. Garbaskas, 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 Trans. Appl. Supercon., Vol. 3, p. 946, 1993.
- [5] T. Hase, K. Shibutani, S. Hayashi, M. Himada, and R. Ogawa, "Fabrication of superconductively jointed silver-sheathed Bi-2212 tape", Cryogenics, Vol. 36, p. 21, 1996.
- [5] S. S. Oh, H. S. Ha, D. W. Ha, H. M. Jang, C. Park, K. J. Song, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu, "Development of Bi-2223 HTS tape and its application to coil and current leads", Cryogenics, Vol. 42, p. 377, 2002.
- [6] J. H. Kim, K. T. Kim, J. Joo, and W. Nah, "Measurement of joint properties of Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O (2223) tapes by field decay technique", Physica C, Vol. 372-376, p. 909, 2002.
- [7] 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. 15, p. 1600, 2002.
- [8] 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, p. 605, 1997.
- [9] 김정호, 김규태, 주진호, 나완수, "Bi(2223) 다심 초전도 선재의 접합공정 연구", 전기전자재료학회논문지, 14권, 6호, p. 511, 2001.
- [10] 김정호, 김규태, 주진호, 나완수, 하홍수, 오상수, "고온 초전도 선재의 접합공정 연구", 한국전기전자재료학회 2001년도 춘계학술대회 논문집, p. 41, 2001.
- [11] A. Jeremie and R. Flukiger, "Effect of controlled carbon impurities on J_c in Ag/Bi(2223) tapes", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 30, No. 4, p. 1883, 1994.
- [12] H. S. Ha, S. S. Oh, D. W. Ha, K. J. Song, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu, "Bubbling in the fabrication of Bi-2223/Ag wires using PIT process", Physica C, Vol. 372-376, Part 2, p. 956, 2002.