

Development and properties of jointed Bi-2223 superconductor tape

Jung Ho Kim^a, Bong Ki Ji^a, Hyung Sang Park^a, Ho Jin Kim^a, Seung Jin Oh^a,
Joong Seok Kim^a, Jinho Joo^a, and Wansoo Nah^b

Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^a *School of Metallurgical and Materials Science Engineering*

^b *School of Electrical and Computer Engineering*

Abstract

We evaluated the electric properties of Bi-2223 jointed tapes processed by both resistive- and superconducting-joint methods. For the resistive-joint, filler materials of wood metal, Pb/Sn, In, and silver paste were used, whereas, for the superconductive-joint, the lap joint method were used.

In the resistive-joint tape, it was observed that the electrical properties such as current transport property, n -value, and contact resistance of the tape were significantly related to the resistivity of filler materials. On the other hand, in the superconducting-joint tape, the current transport property was dependent on the uniaxial pressure. Specifically, the current transport property varied 50 to 80% with uniaxial pressure, probably due to the irregular microstructure in the transition region.

Keywords : Bi-2223 tape, current transport property, filler materials, resistive-joint, superconducting-joint,

1. 서론

Bi-2223 고온 초전도 선재를 영구전류모드에 적용시키기 위해서는 초전도스위치와 마그네트 사이에 초전도 접합은 필수적이며 전체 시스템의 안정성을 평가하기 위해서 초전도 접합에 대한 특성평가는 중요하다.

Bi-2223 초전도 선재의 접합방법은 상전도 접합(Resistive-joint)과 초전도 접합(Superconducting-joint) 방법이 있다. 상전도 접합방법은 삽입재료(filler materials)를 이용하여 두 선재를 접합시키는 방법이며, 초전도 접합방법은 초전도심과 초전도심끼리 직접 접촉시키는 방법으로 접합저항(contact resistance)이 $10^0 \sim 10^{12} \Omega$ 정도이다[1,2].

각 접합방법의 특징으로는 상전도 접합방법의 경우 접합저항이 상대적으로 크지만 공정이 간단하고 접합 후 열처리를 하지 않는 장점이

있고, 초전도 접합은 이와 반대로 공정이 복잡하고 접합 후 열처리를 해야 하나 접합저항이 작은 장점을 가지고 있다. 하지만 균일한 자장을 유지해야하는 MRI, NMR 등의 마그네트의 접속부에 적용하기 위해서는 초전도 접합방법이 필요한 것으로 사료된다.

접합부의 특성을 평가하기 위해서는 통전율(CCR)이나 굽힘변형률(bending strain), 인장강도(tensile strength), 열충격 특성(thermal shock) 등이 기본적으로 평가되어야 하며 접합저항의 측정이나 저항전이지수(n 값)가 계산되어야 한다. 특히 접합저항 측정은 저온초전도에서는 측정방법이 많이 연구되었으나 고온초전도의 경우에는 접합방법 연구가 되었을 뿐 아직 측정값과 측정방법에 대해서는 많은 연구가 필요한 실정이다. 또한 저항전이지수는 무단위(unitless)로 저항이 없는 상태에서 상전도 상태로의 전이정도를 나타내는 변수로 사용되며 그 값이

클수록 초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이가 급속이 일어나고, 작을수록 전이가 완만하게 일어난다.

그러므로 본 연구에서는 Bi-2223 선재를 상전도 접합 및 초전도 접합방법으로 각각 제조하여 V-I 곡선을 구한 후 통전율, n 값 그리고 접합저항을 측정하였다. 특히 상전도 접합방법에서는 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste 등의 다양한 삽입재료를 사용하여 접합부의 임계특성을 비교하였다. 초전도 접합방법에서는 중요한 공정변수인 단일축 압력을 달리하여 미세조직과 임계특성을 관찰하였으며, 자장감쇄법(Field decay measurement)을 이용하여 접합저항을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. Bi-2223 선재의 제조 및 접합선재 제조

합성된 Bi-2223 분말을 은(Ag) 튜브(O.D. 6.35 mm, I.D. 4.35 mm)에 삽입하고, 선재형태로 만들기 위해 스웨이징(swaging), 인발(drawing), 압연(rolling) 공정을 반복하여 행하였다. 최종 시편의 두께와 폭은 각각 160-220 μm 와 3.2 mm로 가공되었으며 소결은 840°C, 대기분위기에서 50 시간 열처리하여 초전도 선재를 제조하였다.

상전도 접합은 소결된 선재를 인듐(In), Pb/Sn, wood metal, silver paste 를 삽입재료로 사용하여 접합하였다. 그리고 실험에 사용된 접합시편은 서로 데이터를 비교할 수 있도록 시편의 길이와 접촉부의 면적(10 mm× 3.2 mm)을 같게 하였으며 삽입재료를 균일하게 적용하였다. 초전도 접합은 lap-joint 방법을 택하였으며, 접합부분만을 부식액으로 제거한 후 초전도심과 초전도심을 서로 접촉시키고 접합부분만을 400-4,000 MPa 범위에서 단일축 압력(uniaxial press)을 가하였다. 가압공정 후 840°C, 대기분위기에서 50 시간 재소결하여 제조하였다(그림 1 참고). 또한, 자장감쇄법을 이용하여 초전도 접합한 선재의 접합저항을 측정하기 위해서 총 시편의 길이 13 cm, 접촉길이 1 cm로 하여 원형루프 형태의 시편을 제조하였다.

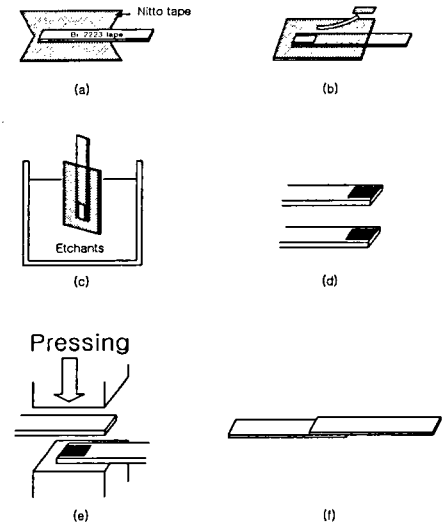


Fig. 1. Schematic of the superconducting joint process of Bi-2223 tape

임계전류값은 4 단자법(four-point probe)으로 측정하였으며 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 적용하였다. 저항전이지수(n 값)는 V-I 곡선으로부터 1 $\mu\text{V}/\text{cm} \leq E \leq 5 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 전계범위에서 구하였다. 접합저항은 상전도 접합된 선재의 경우에는 V-I 곡선으로 구하였으며, 초전도 접합선재에서는 자장감쇄법(Field decay measurement)을 이용하여 측정하였다. 미세조직은 광학현미경으로 관찰하였다.

2.2. 자장감쇄법(Field decay measurement)

자장감쇄법은 10^{-10} 이하의 저항값은 4 단자법으로 측정이 어려우므로 hall sensor 를 이용하여 유도 자장을 측정하여 접합저항을 구하는 방법이다[3]. 그림 2는 초전도 접합을 이용하여 원형루프로 제조된 선재의 자장감쇄 측정장치를 나타내고 있다. 먼저 접합부를 갖는 원형 루프에 전류를 여기시킬 수 있는 1차 코일이 있으며, 코일에 유기된 자장의 측정은 hall sensor(Lake shore HGCA-3020)를 이용하였으며, 원형 루프를 정상상태로 만들기 위해 히터(25 W)를 부착하였다.

측정원리는 1차 코일인 외부마그네트에서 원형루프에 자장을 인가해준 후 히터를 작동시

켜 원형루프를 정상상태로 만든다. 다시 히터를 켜고 1차 코일을 discharge 시키면서 hall sensor로 유도된 자장 값을 측정하여 접합선재의 접합저항을 측정하는 방법이다. 접합저항을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$B(t) = B_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

$B(t)$ 는 시간에 따른 자장 변화값, B_0 는 초기 자장값, τ 는 시간변수이다. τ 는 $\tau=L/R$ 로 표시되고, L 은 원형루프의 self inductance이고, R 은 접합부에서의 저항값이다.

3. 결과 및 고찰

실험에 사용된 비접합 단심선재의 임계전류값은 12.9~16.5 A, 저항전이지수는 14.6으로 측정되었다. 일반적으로 Bi-2223 선재의 n 값은 전계범위 $1 \mu V/cm \leq E \leq 5 \mu V/cm$ 에서 15~20 정도로 보고되므로 측정값은 문헌값과 유사하다.

삽입재료를 이용하여 상전도 접합한 선재의 미세조직 사진을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 선재사이에 wood metal과 Pb/Sn 삽입재료는 균일하게 분포되어 있고 계면형태가 직선적이며 습윤성(wettability)도 우수함을 알 수 있다. In과 Silver paste를 사용한 경우에도 이와 유사하게 계면상태가 우수한 것으로 관찰되었다.

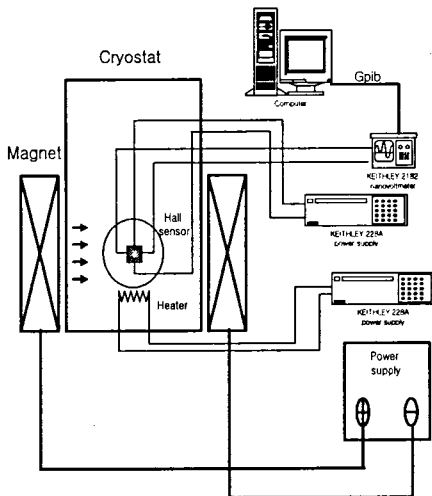


Fig. 2. Schematic of field decay measurement

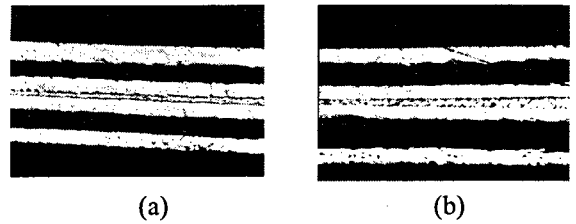


Fig. 3. Optical micrographs showing longitudinal cross section of resistive-joint used by (a) wood metal and (b) Pb/Sn

초전도 선재를 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 삽입재료를 달리하여 상전도 접합한 선재와 비접합 선재의 V-I 곡선을 그림 4에 나타내었다. 접합에 사용된 초전도 선재는 임계전류값이 12.9~16.5 A의 범위를 가지는 시편을 택하였다. 그림으로부터 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 접합된 선재의 임계전류값은 각각 1.5, 3.8, 6.5, 11.1 A로 측정되었다. 접합에 사용된 비접합 선재의 임계전류값에 대한 접합 선재의 임계전류값으로 접합부의 통전율(CCR, critical current ratio)[4]을 구하였다. 통전율은 wood metal을 사용하였을 때 약 10%로써 통전능력이 상당히 감소하였으며, Pb/Sn의 경우 통전율은 20-30%로 측정되었다. 또한 In과 silver paste를 사용하였을 때 통전율이 각각 40-50%와 70-85%으로 silver paste 경우 통전능력이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

n 값은 전계범위 $1 \mu V/cm \leq E \leq 5 \mu V/cm$ 에서 계산했을 때 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 접합된 선재에서 각각 ~1, 1.6, 1.8, 8.9로써 서로 큰 차이를 나타내었다. 상전도 접합한 선재에서 임계전류값, 통전율 및 n 값을 표 1에 요

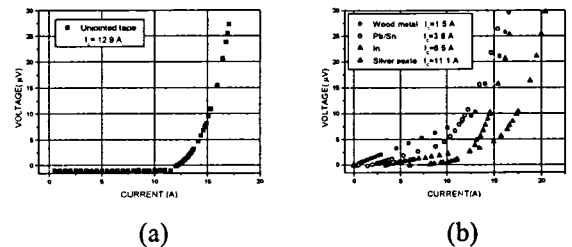


Fig.3. V-I curves of (a) unjointed tape and (b) resistive-joint tape

약하였다. 삽입재료의 종류에 따라 임계전류값, 통전율과 n 값의 정도는 유사한 경향으로 변하는 것을 알 수 있으며 전반적으로 낮은 n 값을 갖는 이유는 초전류가 삽입재료를 통과하므로 초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이가 완만하게 나타나는 것으로 판단된다. Silver paste의 경우에는 다른 삽입재료와 달리 접합부에 열이 직접적으로 가해지지 않아 초전도선재의 손상이 적었고 접합부분을 균일하게 접촉시킬 수 있어 통전율과 n 값의 특성이 우수하게 나타나는 것으로 사료된다.

상전도 접합된 선재의 접합저항을 그림 4(b)로부터 구하여 삽입재료의 비저항값과 함께 표 2에 나타내었다. Wood metal, Pb/Sn, In으로 접합된 선재의 접합저항은 각각 0.71×10^{-6} , 0.52×10^{-6} , 0.33×10^{-6} Ω 으로 측정되었으며 silver paste로 접합된 경우에는 0.13×10^{-6} Ω 으로 가장 낮게 측정되었다. 접합저항의 상대적인 차이는 일반적으로 삽입재료의 비저항 및 삽입재료와 초전도선재 사이의 계면과 연관이 있다. 삽입재료의 비저항은 상온에서 측정하였으며 wood metal, Pb/Sn, In 재료에서 각각 55.6×10^{-6} , 15.0×10^{-6} , 7.2×10^{-6} Ω-cm로 측정되었으며 silver paste 경우에는 Ag의 문헌값인 1.6×10^{-6} Ω-cm으로 가정하였다[10].

그러므로 고유 비저항값이 작을수록 접합선재의 접합저항은 낮아짐을 알 수 있으며 비례관계의 규칙성은 다소 다르게 나타났다. 또한 상전도 접합방법은 NMR, MRI 등의 고균일한 자장을 얻기 위한 마그네트의 영구전류장치에서 10^{-10} Ω 정도의 접합저항이 요구되는 것을 감안하면 약 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 정도 큰 값을 갖는 것을

Table 2. Resistance of resistive-jointed tapes and resistivity of filler materials

	Resistance of jointed tape [Ω]	Resistivity of filler materials [Ω -cm]
Wood metal	0.71×10^{-6}	55.6×10^{-6}
Pb/Sn	0.52×10^{-6}	15.0×10^{-6}
In	0.33×10^{-6}	7.2×10^{-6}
Silver paste	0.13×10^{-6}	1.6×10^{-6}

알 수 있다.

초전도 접합된 선재의 미세조직 사진을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보듯이 단일축 압력에 의해 초전도심들은 직접 접촉되었으며 접합부와 비접합부의 계면형태는 규칙성을 보였다. 반면에 접합부와 비접합부 사이의 천이 지역은 단일축 압력을 받아 불규칙하게 변형되었으며, 피복재료의 일부가 내부로 침투되어 초전도심의 단면적이 감소되는 현상이 관찰되었다. 그러므로 초전도 접합선재의 임계특성은 불규칙한 천이지역에서 감소될 것으로 추측되며, 단일축 압력의 정도에 따라 이 부분에서 미세조직의 균일성과 임계특성은 영향을 받을 것이다.

그림 6은 140-4,000 MPa 범위에서 다양한 단일축 압력으로 제조한 초전도 접합선재의 통전율을 나타내었다. 측정된 통전율의 범위는 55-85%로 단일축 압력에 따라 변하였으며,

Table 1. Critical current, critical current ratio and n-value of resistive jointed tapes

	Critical current (A)	Critical current ratio (%)	n-value
Wood metal	1.5	10	1
Pb/Sn	3.8	20-30	1.6
In	6.5	40-50	1.8
Silver paste	11.1	70-85	8.9

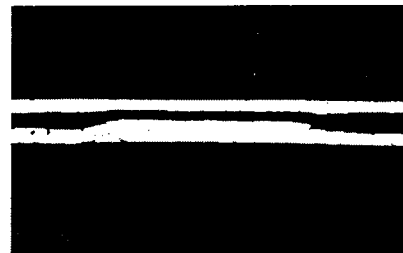


Fig. 5. Optical micrograph showing longitudinal cross section of jointed tape processed by lap-joint method

wood metal, Pb/Sn, In 을 적용한 상전도 접합선재보다도 우수하였다. 그림에서 보듯이 ~400 MPa 정도의 낮은 압력 범위에서는 통전율이 55-70% 정도로 나타났으며 압력이 증가함에 따라 1,600 MPa에서는 ~85%로 높게 나타났다. 압력이 증가함에 따라 통전율이 향상되는 이유는 초전도심의 밀도와 a-b 방향으로의 집합조직이 향상되었고 초전도심끼리 완전히 접촉되었기 때문으로 사료된다 이 후 더 큰 압력에서는 통전율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 이유는 초전도심에서 계면의 불규칙성이 심화되고 단면적의 감소와 함께 균열이 발생하기 때문으로 판단된다[5].

초전도 접합선재에서는 접합지역, 천이지역, 비접합지역에 따라 n 값의 크기는 각각 다를 것으로 예상되며 이는 n 값이 결정립의 크기, 연결성, 집합조직, 순도 등의 미세조직과 밀접한 연관이 있기 때문이다. n 값은 천이지역에서의 불균일한 미세조직에 의해 낮을 것으로 판단되며 이로 인해 전체 시편의 n 값도 감소될 것으로 생각된다. 그러나 본 실험에서 측정된 값은 9-18의 범위로써 넓은 분포를 나타내며, 상전도 접합선재보다는 높게 나타났으나 통전율값과 비교할 때 규칙성이 관찰되지 않았다.

그림 7은 Pb/Sn 삽입재료를 이용한 상전도 접합과 초전도 접합방법으로 제작한 원형루프의 시간에 따른 유도자장값 변화를 나타낸 것이다. 이 원형루프의 인덕턴스는 $0.075 \mu\text{H}$ 로 계산되었다. 그림에서 상전도 접합을 이용한 원형루프의 경우는 약 1 초 이내에 유도자장값이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 이러한 이

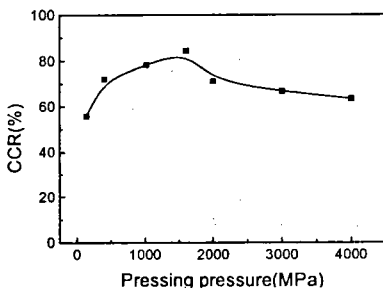


Fig. 6. Dependence of the ratios of critical current on uniaxial pressure

유는 원형루프의 인덕턴스가 매우작고 접합저항이 크므로 페루프로 유도전류가 흐르지 못하고 접합부를 통과한 유도전류가 순간적으로 소멸되었기 때문이다.

초전도 접합방법을 이용한 원형루프의 영구전류 특성은 약 120 초 동안에 유도 자장 값이 상대적으로 완만하게 감소하는 현상을 보이며 이후 약 5 gauss 의 유도자장 값이 유지되는 것으로 관찰되었다. 측정된 상전도 접합에 비하여 상대적으로 우수하게 나타난 영구전류 특성은 초전도심끼리 직접 접촉되었기 때문으로 판단된다. 그러나 실제 유지된 유도자장 값이 상당히 낮고 hall probe 의 측정 한계값과 유사하여 정확한 접합저항값을 평가하기가 힘들었다. 그러므로 임계전류값이 수십 A 이상의 선재를 사용하고, 길이를 수 m 이상인 선재를 pancake 형태로 만든 후 접합하여 MPS(magnetic power supply)와 절연증폭기를 사용하면 좀 더 정확한 데이터를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결론

Bi-2223 단심선재를 초전도 접합과 상전도 접합방법으로 접합하여 미세조직과 특성을 평가하였다. 상전도 접합선재에서는 삽입재료에 따라 통전율과 n 값이 각각 10-85%, 1-8.9 로 큰 차이를 보였으며 접합저항은 $0.71 \times 10^{-6} \sim 0.13 \times 10^{-6} \Omega$ 범위로 나타났다. 특히 통전율, n 값, 접합저항 등은 삽입재료의 전기비저항에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다. 초전도 접합으로 제조된 선재에서는 통전율이 상대적으

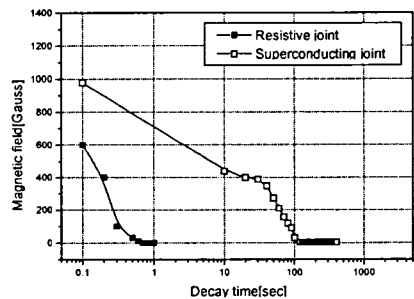


Fig. 7. The decay behaviours of induced field of resistive and superconductive jointed tapes

로 더 높은 값을 보였다. 또한 단일축 압력에 의해 통전율은 55-85%로 나타났으며, 천이지역에서 불균일한 미세조직에 의해 전기적 특성이 영향을 받는 것으로 관찰되었다.

감사의 말씀

본 연구는 교육부(학술진흥재단)의 학술연구 조성비에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K.Chen, C. H. Tai and L.Hong, "Development of High-Tc Superconducting Bi-2223 Tape Joints", *Journal of superconductivity*, 9, 281-285(1996).
- [2] Z. Han, P. Vase, Y. Q. Shen and T. Freltoft, "Superconducting Bi_{1.8}Sr₂Ca₂Cu₃O_x Closed-loop Coils Carrying Persistent Current at Temperature above 77K", *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, 7, 873-876(1997).
- [3] Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 2. Joint evaluation technique", *Cryogenics*, 16, 217-219(1976)
- [4] J.H.Kim and J.Joo, "Fabrication and characterization of the joining of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape.", *Superconductor Science and Technology*, 13,237-243(2000)
- [5] J.H.Kim, B.K.Ji,J.Joo,C-W.Yang and W.Nah, "Superconducting Joint between Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Superconductor Tapes", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 10, 1182-1185(2000)