

Bi-2223 초전도선재의 상전도- 및 초전도-접합부 특성평가

Characterization of resistive- and superconducting-joint of Bi-2223 superconductor tape

김정호*, 지봉기*, 박형상*, 임준형*, 오승진*, 주진호*, 황보훈**, 나원수**

Jung Ho Kim*, Bong Ki Ji*, Hyung Sang Park*, Jun Hyung Lim*, Seung Jin Oh*, Jinho Joo*,

Hoon Hwangbo** and Wansoo Nah**

Abstract

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

In the resistive joint tape, critical transport property(CCR), n-value, and contact resistance were observed to be in the range of 10-85%, 1-8.9, and 0.71×10^{-6} - $0.13 \times 10^{-6} \Omega$, respectively, depending on their filler materials. Specifically, it is believed that the electrical properties of resistive joint tape are significantly related to the resistivity of filler materials. On the other hand, the CCR of superconducting joint tape was varied 55 to 85% with uniaxial pressure, probably due to the irregular microstructure in the transition region.

Key Words(중요용어) : resistive-joint, superconducting-joint, filler materials, lap joint, field decay measurement

1. 서 론

Bi-2223 고온 초전도 선재는 초전도한류기, 발전기, 모터, 마그네트, 변압기, 송전선 등의 전력기기 분야에 응용되어질 수 있다. 이러한 분야에 응용되기 위해서는 초전도 선재의 접합은 필수적이며, 우수한 전기적, 기계적, 열적특성을 갖는 접합방법이 적용되어야 한다. 특히 초전도 선재의 접합은 영구전류모드에 적용되어질 수 있는데 접합부에서 저항이 높게되면 영구전류의 감소가 발생하여 고균등 자장을 유지하기 어렵기 때문에 더욱 저항이 낮은 접합방법이 적용되어야 한다.

Bi-2223 초전도 선재의 접합방법으로는 상전도 접합(Resistive joint)과 초전도 접합(Superconducting joint) 방법으로 나눌 수 있다. 상전도 접합은 인듐(In), Pb/Sn, wood metal, silver paste 등을 삽입재료(filler materials)로 사용하여 두 선재간을 접합시키는 방법이며, 초전도 접합은 초전도심과 초전도심끼리 직접 접촉시키는 방법으로 접합저항(contact resistance)이 $10^{-12} \sim 10^{-15} \Omega$ 정도이다. 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 마그네트에 적용하기 위해서는 초전도 접합방법이 필요한 것으로 사료된다.

접합부의 특성을 평가하기 위해서는 전기적 특성인 통전율(CCR)이나 기계적 특성인 굽힘변형률(bending strain),

* : 성균관대학교 금속재료공학부
(경기도 수원시 장안구 천천동 300, Fax 0331-290-7371 E-mail : jinho@yurim.skku.ac.kr)
** : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부
2000년 1월 25일 접수, 2000년 2월 10일 심사완료

인장강도(tensile strength), 열충격 특성(thermal shock) 등이 평가되어야 하며 접합저항의 측정이나 저항전이지수(n 값)가 계산되어야 한다. 특히 저항전이지수는 무단위(unit-less)로 저항이 없는 상태에서 상전도 상태로의 전이정도를 나타내는 변수로 사용되며 그 값이 클수록 초전도 상태에서 상전도 상태로의 전이가 급속이 일어나고, 작을수록 전이가 완만하게 일어난다.

현재 고온초전도 선재의 집합방법은 여러 그룹의 연구결과에 의해 다양한 공정방법이 확립되고 있다. 최근에 Bi-2212의 선재와 bulk ring⁽²⁾, YBCO의 thin film 및 bulk ring^(3,5)을 이용하여 집합공정과 영구전류 특성이 보고되었다. Bi-2223 초전도 선재의 집합공정과 영구전류특성에 관한 연구는 pancake 형태에서 보고되었으나^(1,6) 결과가 서로 상이하고 신뢰성을 갖기에는 연구보고가 매우 부족하며 체계적으로 연구되지 않은 상태이다.

그러므로 본 연구에서는 Bi-2223 선재를 상전도 집합 및 초전도 집합방법으로 각각 제조하여 4 단자법으로 V-I 곡선을 구한 후 통전을, n 값 그리고 접합저항을 측정하였다. 특히 상전도 집합방법에서는 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste 등의 다양한 삽입재료를 사용하여 집합부의 임계특성을 비교하였다. 초전도 집합방법에서는 중요한 공정변수인 단일축 압력을 달리하여 미세조직과 임계특성을 관찰하였으며, 자장감쇄법(Field decay measurement)을 이용하여 접합저항을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1. Bi-2223 선재의 제조 및 집합선재 제조

초전도 분말의 조성이 $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_{2.2}Cu_3O_x$ (2223)가 되도록 Bi_2O_3 , PbO, $SrCO_3$, $CaCO_3$, CuO 분말들을 적절히 혼합하여 고상반응법(solid state reaction)으로 제조하였다. 하소공정은 산소분위기에서 505-835℃까지 여러단계를 거쳐 총 27 시간 하소처리를 하였으며, 이후 CO₂가 없는 분위기(CO₂-free air)에서 865℃까지 승온시켜 총 100 시간 동안 탈기처리를 하여 2223 분말을 제조하였다.

합성된 2223 분말은 은(Ag) 튜브(O.D. 6.35 mm, I.D. 4.35 mm)에 삽입하여 시편을 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℃, 대기분위기에서 50 시간 열처리하여 초전도 선재를 제조하였다.

상전도 집합은 소결된 선재를 인듐(In), Pb/Sn, wood

표 1. 삽입재료의 종류, 용융온도 및 조성

Table 1. Filler materials and their melting point and composition

Materials	Melting point	Composition
Wood metal	65-70 ℃	50%Bi,25%Pb, 12.5%Sn,12.5%Cd
Pb/Sn	183 ℃	37%Pb,63%Sn
In	155 ℃	99.9% (purity)
Silver paste		Silver * Butyl acetate

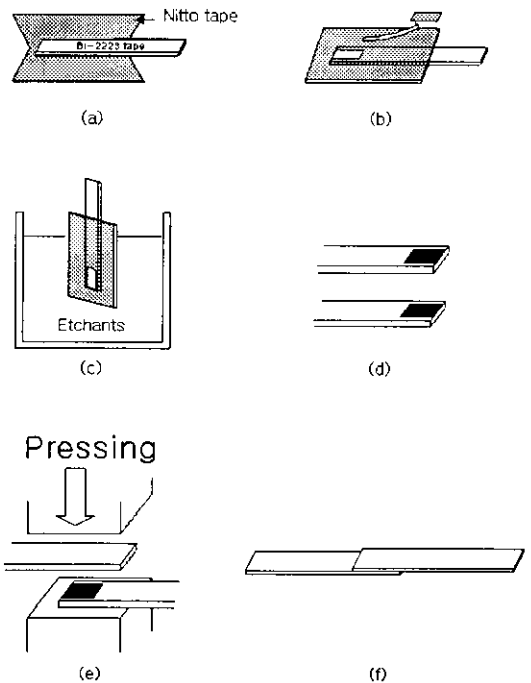


그림 1. Bi-2223 초전도 선재의 초전도 집합공정
Fig. 1. Schematic of the superconducting joint process of Bi-2223 tape

metal, silver paste를 삽입재료로 사용하여 집합하였다. 삽입재료의 종류와 용융온도 및 조성을 표 1에 나타내었다. 그리고 실험에 사용된 집합시편은 서로 데이터를 비교할 수 있도록 시편의 길이와 접촉부의 면적(10 mm×3.2 mm)을 같게 하였으며 삽입재료의 양을 균일하게 적용하였다. 초전

도 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℃, 대기분위기에서 50 시간 재소결하여 제조하였다(그림 1 참조). 또한, 자장감쇄법을 이용하여 초전도 접합한 선재의 접합저항을 측정하기 위해서 총 시편의 길이 13 cm, 접촉길이 1 cm로 하여 원형루프 형태의 시편을 제조하였다.

임계전류값은 4 단자법(four-point probe)으로 측정하였으며 1 μW/cm의 기준을 적용하였다. 저항전이지수(n 값)는 V-I 곡선으로부터 1 μW/cm ≤ E ≤ 5 μW/cm의 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 sensor를 이용하여 유도 자장을 측정하여 접합저항을 구하는 방법이다.^[7] 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 이용하였

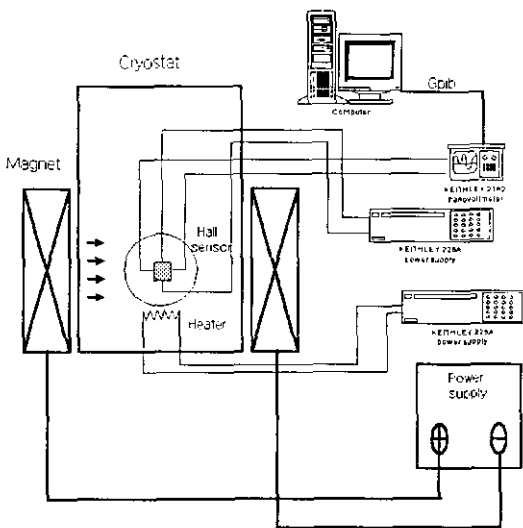


그림 2. 자장감쇄법 측정장치의 개요도
Fig. 2. Schematic of field decay measurement

으며, 원형 루프를 정상상태로 만들기 위해 히터(25 W)를 부착하였다.

측정원리는 1차 코일인 외부마그네트에서 원형루프에 자장을 인가해준 후 히터를 작동시켜 원형루프를 정상상태로 만든다. 다시 히터를 끄고 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, B₀는 초기 자장값, τ는 시간변수이다. 감쇄시정수 τ는 τ = L/R로 표시되고, L은 원형루프의 self inductance이고, R은 접합부에서의 저항값이다.

3. 결과 및 고찰

Powder-in-tube 방법으로 제조한 Bi-2223 초전도 단심 선재의 임계전류값과 n 값을 측정하기 위하여 액체질소 온도에서 V-I 곡선을 구하여 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 이 선재의 임계전류 값은 12.9 A로 측정되었고 저항전이지수(n 값)는 일반적인 전계범위 1 μW/cm ≤ E ≤ 5 μW/cm에서 계산했을 때 14.6으로 측정되었다. 일반적으로 Bi-2223 선재의 n값이 15~20 정도로 보고되고 있으며 측정된 값은 문헌값과 유사함을 알 수 있다.

삼입재료를 이용하여 상전도 접합한 선재의 미세조직 사진을 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 선재사이에 wood metal과 Pb/Sn 삼입재료는 균일하게 분포되어 있고 계면형태가 직선적이며 습윤성(wettability)도 우수함을 알 수 있

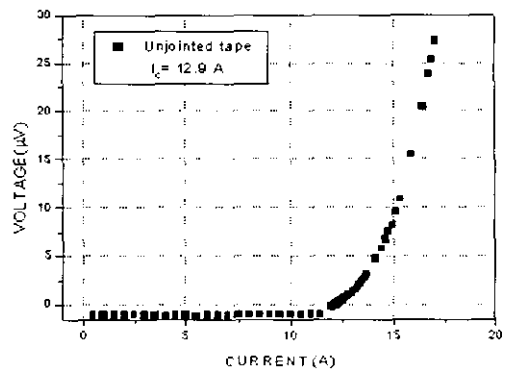
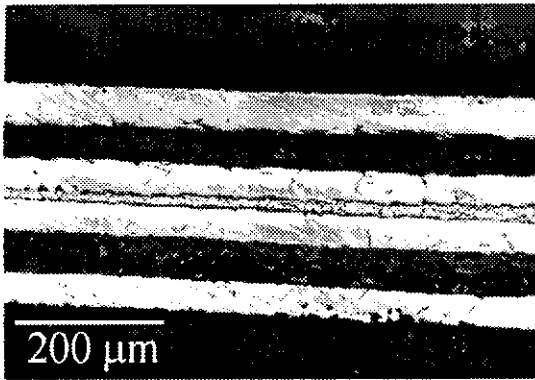
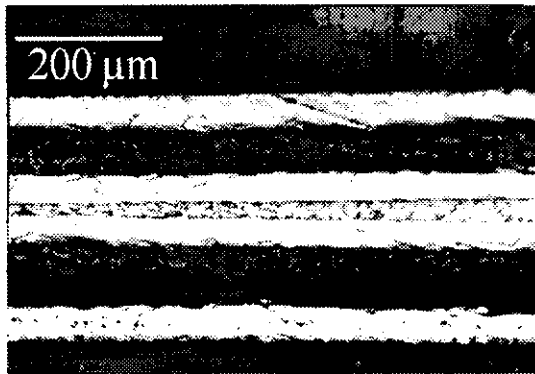


그림 3. 비접합 초전도 선재의 V-I 특성곡선
Fig. 3. V-I curve of unjointed superconductor tape



(a)



(b)

그림 4. (a) Wood metal 과 (b) Pb/Sn을 이용하여 상전도 접합한 선제의 미세조직 사진
Fig. 4. Optical micrographs showing longitudinal cross section of resistive-joint used by (a) wood metal and (b) Pb/Sn

다. In과 silver paste를 사용한 경우에도 이와 유사하게 계면상태가 우수한 것으로 관찰되었다.

초전도 선제를 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 삽입재료를 달리하여 상전도 접합한 선제의 V-I 곡선을 그림 5에 나타내었다. 접합에 사용된 초전도 선제는 임계전류값이 12.9~16.5 A의 범위를 가지는 시편을 택하였다. 그림으로부터 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 접합된 선제의 임계전류값은 각각 1.5, 3.8, 6.5, 11.1 A로 측정되었다. 접합에 사용된 비접합 선제의 임계전류값에 대한 접합선제의 임계전류값으로 접합부의 통전율(CCR, critical current ratio)^{18,9)}을 구하였다. 통전율은 wood metal을 사용하였을 때 약 10%로써 통전능력이 상당히 감소하였으며,

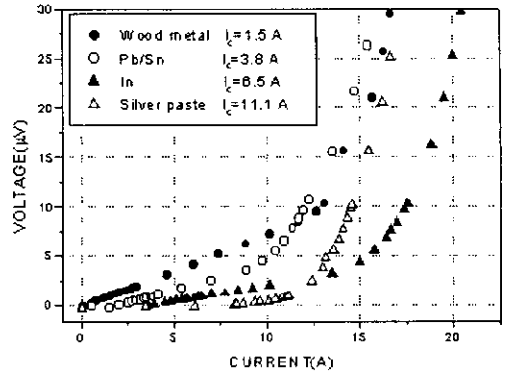


그림 5. 상전도 접합된 초전도 선제의 V-I 특성곡선
Fig. 5. V-I curves of resistive jointed superconducting tapes

표 2. 상전도접합 선제에서의 임계전류 값, 통전율 및 n 값
Table 2. Critical current, critical current ratio and n-value of resistive jointed tapes

	Critical current (I_c , A)	Critical current ratio (CCR, %)	n-value ($1 \mu W/cm \leq E \leq 5 \mu W/cm$)
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

Pb/Sn의 경우 통전율은 20-30%로 측정되었다. 또한 In과 silver paste를 사용하였을 때 통전율이 각각 40-50%와 70-85%로 silver paste 경우 통전능력이 가장 우수한 것을 알 수 있다.

n 값은 전계범위 $1 \mu W/cm \leq E \leq 5 \mu W/cm$ 에서 계산했을 때 wood metal, Pb/Sn, In, silver paste로 접합된 선제에서 각각 ~1, 1.6, 1.8, 8.9로써 서로 큰 차이를 나타내었다. 상전도 접합한 선제에서 임계전류값, 통전율 및 n 값을 표 2에 요약하였다. 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 초전도선제의 손상이 적었고 접합부분을 균일하게 접촉

표 3. 상전도접합 선재에서 저항(77K)과 비저항(77K) 및 삽입재료의 비저항(RT)

Table 3. Resistance(77K) and resistivity(77K) of resistive jointed tapes and resistivity(RT) of filler materials

	Resistance of jointed tapes [Ω , at 77K]	Resistivity of jointed tapes [$\Omega \cdot \text{cm}$, at 77K]	Resistivity of filled materials [$\Omega \cdot \text{cm}$, at RT]
Wood metal	0.71×10^{-6}	3.65×10^{-9}	55.6×10^{-6}
Pb/Sn	0.52×10^{-6}	2.65×10^{-9}	15.0×10^{-6}
In	0.33×10^{-6}	1.69×10^{-9}	7.2×10^{-6}
Silver paste	0.13×10^{-6}	6.66×10^{-10}	1.6×10^{-6} *

* resistivity of pure silver⁽¹⁰⁾

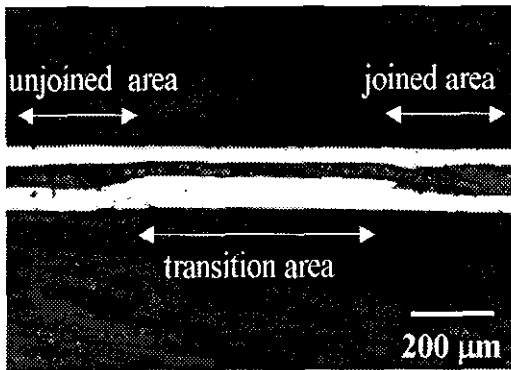


그림 6. Lap-joint 방법에 따른 접합된 선재의 광학 사진
Fig. 6. Optical micrograph showing longitudinal cross section of jointed tape processed by lap-joint method

시킬 수 있어 통전율과 n 값의 특성이 우수하게 나타나는 것으로 사료된다.

상전도 접합된 선재의 접합저항을 그림 5로부터 구하여 삽입재료의 비저항값과 함께 표 3에 나타내었다. Wood metal, Pb/Sn, In 으로 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

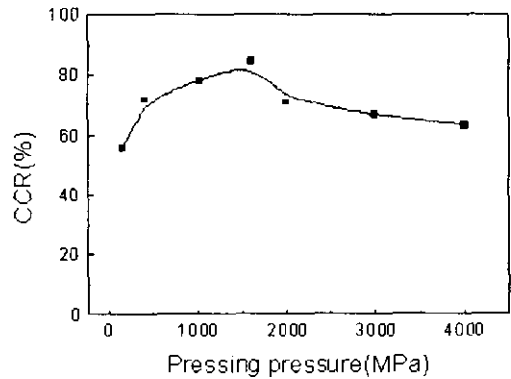


그림 7. 단일축 압력에 따른 임계전류 값의 비
Fig. 7. Dependence of the ratios of critical current on uniaxial pressure

$\times 10^{-6}$, 7.2×10^{-6} Ω -cm로 측정되었으며 silver paste 경우에는 Ag의 문헌값인 1.6×10^{-6} Ω -cm 으로 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 - 10^5 정도 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다.

초전도 접합된 선재의 미세조직 사진을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 단일축 압력에 의해 초전도심들은 직접 접촉되었으며 접합부와 비접합부의 계면형태는 규칙성을 보였다. 반면에 접합부와 비접합부 사이의 천이지역은 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 7은 140-4,000 MPa 범위에서 다양한 단일축 압력으로 제조한 초전도 접합선재의 통전율을 나타내었다. 측정된 통전율의 범위는 55-85%로 단일축 압력에 따라 변화하였으며, wood metal, Pb/Sn, In을 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 향상되

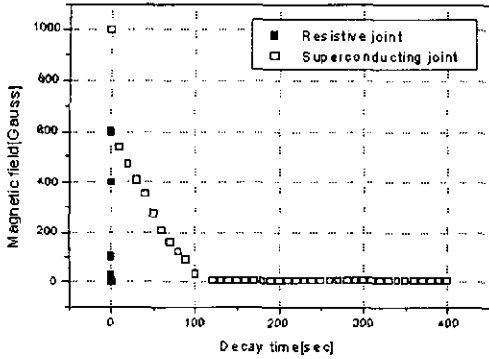


그림 8. 상전도 접합과 초전도 접합선재의 자장감쇠 거동
Fig. 8. The decay behaviours of induced field of resistive and superconductive jointed tapes

있고 초전도심끼리 완전히 접촉되었기 때문에 사료된다.⁽⁸⁾ 이 후 더 큰 압력에서는 통전율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 이유는 초전도심에서 계면의 불규칙성이 심화되고 단면적의 감소와 함께 균열이 발생하기 때문으로 판단된다.⁽¹¹⁾

초전도 접합선재에서는 접합지역, 천이지역, 비접합지역에 따라 n 값의 크기는 각각 다를 것으로 예상되며 이는 n 값이 결정립의 크기, 연결성, 접합조직, 순도 등의 미세조직과 밀접한 연관이 있기 때문이다.⁽¹²⁾ 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 범위로서 넓은 분포를 나타내며, 상전도 접합선재보다는 높게 나타났으나 통전율값과 비교할 때 규칙성이 관찰되지 않았다.

그림 8은 Pb/Sn 삽입재료를 이용한 상전도 접합과 초전도 접합방법으로 제작한 원형루프의 시간에 따른 유도자장 값 변화를 나타낸 것이다. 이 원형루프의 인덕턴스(L)는 0.075 μH 로 계산되었다.⁽¹³⁾ 그림에서 상전도 접합을 이용한 원형루프의 경우는 약 0.5 초 만에 유도자장 값이 급격히 저하됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 원형루프의 인덕턴스가 매우작고 접합저항이 크므로 감쇄시정수(τ)가 작게되기 때문이다. 이 감쇄시정수는 접합저항과 인덕턴스에만 영향을 받기 때문에 간단한 방법으로 감쇄시간을 유추할 수 있는 중요한 변수이다. 위의 결과로부터 Pb/Sn 접합의 경우 접합저항이 $0.52 \times 10^{-6} \Omega$ 이고 원형루프의 인덕턴스를 0.075 μH 로 하면 감쇄시정수는 약 0.15초 만에 감소한다는 사실을 알 수 있으며 이 결과는 실험결과와 비슷하게 나타났다.

초전도 접합방법을 이용한 원형루프의 영구전류 특성은 약 120 초 동안에 유도 자장 값이 상대적으로 완만하게 감소하는 현상을 보이며 이후 약 4 gauss의 유도자장 값이 유지되는 것으로 관찰되었다. 상전도 접합에 비하여 상대적으로 우수하게 나타난 영구전류 특성은 초전도심끼리 직접 접촉되었기 때문으로 판단된다. 그러나 유지된 유도자장 값이 상당히 낮고 또한 hall probe의 측정 한계값과 유사하여 정밀한 접합저항값을 평가하기가 힘들었다. 그러므로 임계전류값이 수십 A 이상의 선재를 사용하고, 길이를 2 m 이상으로 제조하여 측정한다면 다소 정밀한 데이터를 얻을 수 있을 것을 판단되며, 향후 초전도 선재접합의 응용을 위해 정밀한 접합저항값이 평가되어야 한다.

4. 결론

Bi-2223 단심선재를 초전도 접합과 상전도 접합방법으로 접합하여 미세조직과 특성을 평가하였다. 상전도 접합선재에서는 삽입재료에 따라 통전율과 n 값이 각각 10-85%로, 1-8.9로 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 상대적으로 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 학술연구조성비에 의해 연구된 논문입니다.

참고 문헌

- (1) K. Chen, C. H. Tai and L. Horng, "Development of High- T_c Superconducting Bi-2223 Tape Joints", Journal of Superconductivity, Vol. 9, No. 3, pp. 281, 1996
- (2) H. Matsuba, A. Yahara and K. Imai, in Advances in Superconductivity II. Proceedings of the 2nd International Symposium on Superconductivity, edited by T. Ishiguro and K. Kajimure, pp. 683, 1990 (Tokyo)

- [3] E. M. Gyorgy, G. S. Grader, D. W. Johnson, Jr., L. C. Feldman, D. W. Murphy, W. W. Rhodes, R. E. Howard, P. M. Mankiewich and W. J. Skocpol, *Applied Physics Letters*, Vol. 52, pp. 328, 1988
- [4] E. Sandvold and C. Rossel, *Physica C*, Vol. 190, pp. 309, 1992
- [5] W-J. Yeh, L. Chen, F. Xu, B. Bi and P. Yang, *Phys. Rev. B*, Vol. 36, pp. 2414, 1987
- [6] Z. Han, P. Vase, Y. Q. Shen and T. Freltoft, "Superconducting $\text{Bi}_{1.8}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ Closed-loop Coils Carrying Persistent Current at Temperatures above 77K", *IEEE Transactions Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, June, 1997
- [7] Y. Iwasa, "Superconducting joint between multifilamentary wires 2. Joint evaluation technique", *Cryogenics*, 16, pp. 217, April, 1976
- [8] J. H. Kim and J. Joo, "Fabrication and characterization of the joining of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape", *Superconductor Science Technology*, In press
- [9] 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*, In press
- [10] HOWARD H. MANKO, *Solders and soldering*, second edition, McGraw-Hill book company
- [11] J. H. Kim, J. Joo and W. Nah, "Superconducting Joint Between Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Superconductor Tape", 16th. International Conference on Magnet Technology, 1999
- [12] W. H. Warnes, L. D. Cooley and D. C. Larbalestier, *Adv. Cryog. Eng. Mater.* 34, pp. 1009, 1988
- [13] W. Grover, *Inductance calculations*, 1946, Published by D. Van Nostrand Company Inc.