

Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O 초전도 선재의 접합공정 개발

논문
12-4-12

Development of the joining of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconducting tape

김정호*, 김중석*, 주진호*, 윤대호*, 나완수**, 김원주***, 홍계원***

(Jung Ho Kim*, Joong Seok Kim*, Jinho Joo*, Dae-Ho Yoon*, Wansoo Nah**, Weon-Ju Kim***, and Gye-Won Hong***)

Abstract

We evaluated the effects of joining process on the properties of Bi-2223 superconducting tape fabricated by powder-in-tube(PIT) technique. Specifically, we optimized the following processing variables : contact method, selection of masking materials and etchants, sequence of joining process, shape of joined area and pressure have been optimized.

The joining of tapes was carried out using a lap-joint method. In the process, tapes were masked and etched to expose the superconductor core in the shape of 'ㅁ' and 'ㄷ'. The exposed cores of the two tapes were brought into contact, uniaxially pressed in the range of 140-4,000 MPa, and sintered. Subsequently, the current capacity and mechanical property of the joined tape was measured as a function of uniaxial pressure.

It was observed that the current capacity and mechanical strength were significantly dependent on uniaxial pressure. The joined tape, fabricated with a pressure of 1,600 MPa, showed the highest value of current capacity(90%) of the tape itself. The highest point of current capacity is believed to be due to improvements in core density, contacting area and grain alignment. In addition, the strength of the joined tape subjected to pressure of 1,000 MPa was measured to be about 88% of the unjoined tape.

Key Words(중요용어) : $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (2223) 선재, critical current(I_c), lap-joint method, current carrying capacity

1. 서 론

초전도 재료는 완전 전도성(Zero resistance), 완전 반자성(Meissner effect), 조셉슨 효과(Josephson effect) 등의 탁월한 성질 때문에 미래의 다양한 첨단기에 응용될 수 있는 신소재로 인식되고 있다. 초전도 재료가 사용되어질 수 있는 전력기기 분야로는 한류기, 발전기, 모터, 마그네트, 변압기, 송전기 등이 있으며 이러한 기기들을 개발하기 위해서는 초전도체-초전도체, 초전도체-

전류인입선 사이의 접합기술이 확립되어야 한다. 또한 초전도 재료를 응용한 전력기기에는 전기적, 기계적 성질이 우수한 긴 형태로 된 초전도 선재의 개발이 필요하며, 길이는 약 1,000 m 정도, 임계 전류밀도 값은 약 10^4 A/cm^2 가 되어야 한다[1, 2]. 그러나 수백 m 이상의 긴 초전도 선재를 일반적인 powder-in-tube 방법으로 제조하기는 어려우며 수백 m 급의 장선을 서로 접합시켜 제조하면 수천 m 급의 장선을 얻을 수 있어 초전도 선재를 이용한 응용기기들의 개발을 가능케 한다.

초전도 선재의 접합에서 가장 중요하게 요구되는 성질은 접합부에서의 통전율과 기계적인 성질이다. 이는 장선의 초전도 선재를 제조하거나 이를 이용한 초전도 전력기기를 제조할 때 접합부에서 통전율이 낮게되면 초전도체의 전류밀도를 감소시키고, 또한 접합부의 기계적인 성질이 낮으면 사용 중에 발생하는 기계적, 열적응력으로 인해 이 부분에서 파단이 일어나기 때문이다.

* : 성균관대학교 금속재료공학부

** : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부

(경기도 수원시 장안구 천천동 300, Fax : 0331-290-7371 E-mail : jinho@yurim.skku.ac.kr)

*** : 대전시 유성구 한국원자력 연구소

1998년 12월 22일 접수, 1999년 2월 11일 심사완료

Bi-2223(2223) 초전도 선재의 접합에 대한 연구는 여러 그룹에서 보고되었다[3~8]. 초전도 선재를 lap-joint 방법으로 접합시킨 결과, 접합부의 형상이 '口형'인 것은 통전율이 50~80%, 접합부의 형상이 'ㄷ형'인 것은 통전율이 75~90%로 보고되었다. 그러나 이들 논문들은 가압 정도와 열처리 공정변수에 대한 연구가 단편적으로 행하여졌으며 접촉부 형상에 대한 차이와 접합부의 기계적 특성 파악, 접합부의 집합조직 등을 향상시키는 방법에 대해서는 미약한 편이었다. 무엇보다도 상술한 Bi-2223 선재의 접합공정 연구에서는 접합부를 포함한 시편전체를 가압(pressing)하였으므로 장선의 선재 접합에는 적용하기에 곤란하다는 단점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 Bi-2223 선재에서 접촉부만을 가압하는 공정을 택하였으며, 접합공정에 영향을 미치는 인자들 즉 접촉방법, 피복재료의 선정, 부식액의 선정, 소결 전 후 시편의 접합공정순서, 접촉부의 형상, 가압압력 등을 체계적으로 파악하였다. 그리고 이러한 여러 공정변수들을 적절히 조절하여 전기적, 기계적 특성이 우수한 초전도 선재의 접합공정에 대해 연구하였다.

2. 실험방법

초전도 분말의 조성이 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_3\text{O}_x$ (2223)가 되도록 Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaCO_3 , CuO 분말들을 적절히 혼합하였다. 혼합한 분말을 알루미늄이나 불과 함께 폴리에틸렌 용기에 넣어 12시간 볼 밀(ball mill) 처리를 하였다. 하소공정은 대기분위기에서 700℃에서 8시간, 800℃에서 8시간, 855℃에서 8시간 총 24시간, 3회 열처리를 하였으며 이후 800℃, 대기분위기에서 24시간 동안 탈기처리를 하여 2223 분말을 제조하였다.

PIT(powder-in-tube) 방법을 이용하여 초전도 선재를 제조하기 위해 합성된 분말에 냉간 정수압(cold isostatic press, CIP방법)을 가하여 직경 0.42 cm, 길이 8.5 cm 크기의 billet으로 성형하였다. 이 성형체를 99.9%의 은(Ag) 튜브(O.D. 6.35 mm, I.D. 4.35 mm)에 삽입하여 다시 냉간 정수압을 가하였다. 시편을 선재 형태로 만들기 위해 스웨이징(swaging), 인발(drawing), 압연공정(rolling)을 행하였으며 매 공정시 단면감소율은 약 10~15%로 하였다. 최종시편의 두께와 폭은 각각 200 μm, 1.7 mm이며 소결시간은 840℃, 50시간을 행하여 초전도 선재를 제조하였

다.

PIT 방법으로 제조된 초전도 선재를 먼저 접촉부 형상 부분만을 남기고 접착력과 내부식성이 우수한 마스킹재료로 보호한 후 가장 효과적인 부식액을 선정하여 피복재료인 은(Ag)의 일부분을 제거하였다. 마스킹재료는 아세톤으로 제거하고 알코올로 부식액을 세척하였다. 노출된 초전도심(10 mm × 1.5 mm)을 서로 접촉시키고 은(Ag)으로 초전도심을 완전히 감싸주기 위해서 silver paste를 양끝단에 바른 후 접촉부분만을 다양한 단일축압력으로 가하여 840℃, 50시간 다시 재소결처리를 하였다.

임계전류값(critical current)은 4 단자법(four-point probe method)으로 77 K, 0 T, 1 μN/cm 기준으로 행하였다. 기계적인 특성은 만능시험기(Instron)를 이용하였으며, 미세조직 관찰은 광학현미경(optical microscope)과 전자현미경(scanning electron microscope)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

선재접합에 있어서 먼저 고려하여야 할 사항은 접촉방법을 결정하는 것으로써 접촉부의 형상에 따라 기존에 많이 사용되어온 butt-joint 방법이나 lap-joint 방법으로 분류된다. Butt-joint 방법은 공정이 간단하지만 특성상 접촉시키는 면적이 적어 정확하게 접촉시키기가 어려우며 단일축가압에 의한 접합도 부적당하다. 또한 접합부의 기계적인 강도가 매우 취약하여 선재접합에 적용하기가 어렵다. Lap-joint 방법은 공정은 복잡하나 기계적인 강도가 상대적으로 우수하기 때문에 본 연구에서는 lap-joint 방법을 이용하였다.

Lap-joint 접합공정에서 피복재료인 은(Ag)을 제거시키는 방법으로는 기계적인 방법과 화학적인 방법이 있다. 기계적인 방법은 메스를 이용하여 원하는 접촉부 형상을 도려내는 방법으로 공정이 간단하나 다심 초전도 선재와 같이 복잡한 형상을 갖는 선재에는 적용하기가 어렵다. 반면에 화학적인 방법은 마스킹재료로 선재를 감싼 후 원하는 접촉부 형상만을 부식액에 노출시켜 피복재료를 제거(window 형성)시키는 방법이다. 다소 공정은 복잡하나 단심, 다심선재에 모두 적용할 수 있는 장점이 있다. 그러므로 본 연구에서는 초전도 선재를 lap-joint 공정으로, 피복재료는 화학적인 방법으로 제거하여 접합시키는 방법을 택하였다.

3-1. 마스크재료 및 부식액 특성

화학적 제거공정에서 우선 고려하여야 할 변수는 마스크재료와 부식액의 특성평가이다. 이를 위해 내부식성 재료인 Lacquer paint, Teflon tape, Nitto tape 등을 선택하여 은(Ag)표면에 대한 상대적인 접착성, 부식액에 대한 저항성, 부식처리 이후 분리의 용이함에 대해 관찰하였다. 마스크재료의 평가는 다루기 용이함, 부식액의 침투정도, 시편의 손상상태, 피복재료의 잔류정도를 근거로 평가하였다.

표 1에서 보듯이 Lacquer paint는 접착성, 부식 저항성, 분리의 용이함이 보통 수준이었다. Teflon tape은 접착성은 보통 수준이었으나 부식 저항성과 분리의 용이함은 우수하였다. 하지만 접착성이 좋지 못해 부식액이 마스크재료와 피복재료 사이로 침투하여 원하는 형상으로 window를 얻을 수 없었다. Nitto tape의 경우는 접착성, 부식 저항성은 최상수준이었으며 피복재료로부터 분리하는 데는 다소 어려움이 있었다. 하지만 아세톤을 이용하면 쉽게 제거할 수 있어 우수한 마스크재료로 판단되었다.

표 1. Lacquer paint, Teflon tape, Nitto tape의 접착성, 부식액에 대한 저항성, 제거의 용이성.

Table 1. Adhension, resistance to etchant (NH₃ : H₂O₂ : H₂O) and removability of Lacquer paint, Teflon tape and Nitto tape

Property \ Masking materials	Adhesion	Resistance to etching	Removability
Lacquer paint	Fair	Fair	Fair
Teflon tape	Fair	Excellent	Excellent
Nitto tape	Excellent	Excellent	Good

피복재료인 은(Ag)을 제거시키는 부식액은 여러 가지가 있으나 암모니아(NH₃)와 과산화수소수(H₂O₂)의 혼합액이 가장 적절한 것으로 보고되었다[9]. 본 실험에서는 이들 혼합액의 적정 조성비와 부식의 정도를 관찰하기 위하여 Bi-2223 선재를 Nitto tape으로 마스크한 후 접촉부에 window를 만들어 다양한 조성의 암모니아+과산화수

소수 또는 암모니아+과산화수소수+중류수 혼합액에 부식시켜 그 결과를 표 2에 나타내었다.

암모니아와 과산화수소수의 조성비 1 : 1의 혼합액(No. 1)을 사용하였을 때 피복재료(Ag)를 완전히 제거하는데 필요한 시간은 약 1분 정도 소요되었으며 window의 형상이 선명하게 관찰되었다. 그러나 화학액의 조성비가 1 : 1에서 점차 과산화수소수 양에 비해 암모니아 양이 증가할수록 부식속도가 느려지고 window의 형상이 불균일하게 관찰되었으며(No. 2~No. 5), 반대로 과산화수소수의 양이 증가하여도 같은 결과를 나타내었다(No. 6). 또한 암모니아, 과산화수소수, 중류수를 7.35 : 7.35 : 1 이나 12.5 : 12.5 : 1로 혼합한 부식액의 경우에는(No. 7, No. 8) 빠른 부식속도와 함께 window 형상이 가장 선명하게 관찰되어 피복재료 제거공정에 적합한 것으로 나타났다.

표 2. 은(Ag)에 대한 여러 부식액의 비교
Table 2. Comparison of various etchants for Ag

No.	Etchants	Composition ratio	Time to remove Ag sheath
1	NH ₃ : H ₂ O ₂	1 : 1	1 min.
2	NH ₃ : H ₂ O ₂	3 : 2	3 min.
3	NH ₃ : H ₂ O ₂	2 : 1	3 min.
4	NH ₃ : H ₂ O ₂	3 : 1	20 min.
5	NH ₃ : H ₂ O ₂	4 : 1	.
6	NH ₃ : H ₂ O ₂	2 : 3	3 min.
7	NH ₃ : H ₂ O ₂ : H ₂ O	7.35 : 7.35 : 1	≤1 min.
8	NH ₃ : H ₂ O ₂ : H ₂ O	12.5 : 12.5 : 1	≤1 min.

그림 1은 No. 4 부식액과 No. 8 부식액으로 부식시킨 초전도 선재의 window 형상을 나타낸 사진이다. No. 4 부식액을 사용한 경우에는(그림 1(a)) 은이 완전히 부식되지 않았으며 window의 경계부분이 불균일하고 완만하여, window를 통하여 초전도심을 서로 접촉시키기가 부적당하게 나타났다. 반면에 No. 8 부식액을 사용한 경우(그림 1(b)) 원하는 형상으로 은이 완전히 부식되었고 window 가장자리 부분이 선명하게 나타나 노출된 초전도심을 용이하게 접촉시킬 수 있을 것으로 사료된다.

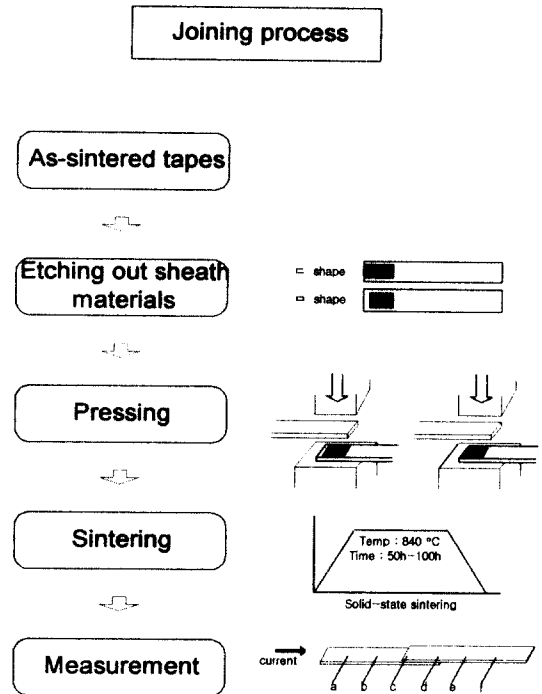


그림 2. Bi-2223 초전도선재의 접합공정 개략도
 Fig. 2. Schematic of the joining process of Bi-2223 superconductor tape

3-2. 접합부의 전기적 특성

접합된 초전도 선재의 경우 접합되지 않는 선재에 비해 임계전류값의 감소가 발생한다. 따라서 임계전류값의 감소가 일어나는 구간과 감소정도를 파악하기 위해 임의의 압력(≈1,000 MPa)으로 가압하여 접합선재를 만들었으며 접합공정의 개략도는 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 각 구간별로 전압단자를 만들어 임계전류값을 측정하였으며, 조건마다 4~6개의 시편으로부터 평균값을 산출하였다. a-b와 e-f구간은 비접합부분(unjoined area), b-c와 d-e구간은 천이부분(transition area), c-d구간은 접합부분(joined area)이다.

그림 3에서 보듯이 비접합부분(a-b, e-f)에서의 임계전류값은 ≈4.5 A로 측정되었으며, 천이부분(b-c, d-e)에서는 ≈3.0 A로 비접합부에서 보다 약 30%정도 감소되었다. 반면에 접합부분(c-d)의 임계값은 ≈7.2 A로 약 60% 정도 증가되었는데 이는 초전도심이 중첩되어 단면적이 증가되었기 때문으로 판단된다. 시편전체(a-f)의 임계전류값은 ≈3.0 A로 측정되어 천이부분과 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났다. 그러므로 접합선재의 임계특성은 천이지역에서 저하되어 전체시편의 임계특성을 감소시키는 것을 알 수 있으며 이러한 결과는 Tkaczyk[3]의 연구와도 일치한다.

접합부의 통전율에 중요한 영향을 미치는 가압변수의 역할과 접촉부의 형상에 따른 통전율의 변화를 파악하기 위해 접촉부의 형상을 '口형', 'ㄷ형'으로 각각 달리하여 140~4,000 MPa의 다양한 단일축압력으로 가한 후 소결처리하여 통전율을 측정하였다. 통전율은 서로 접촉되지 않는 선재부분

에 대한 시편전체에 대한 임계전류비($I_c(a-f)/I_c(a-b) \times 100$)로 나타내었다.

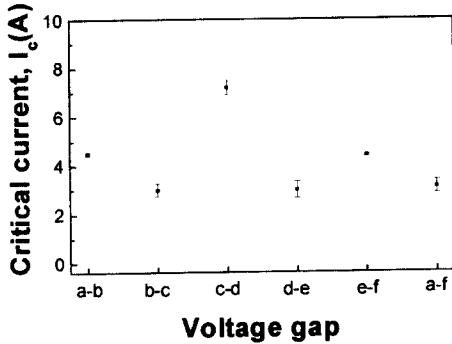


그림 3. 접합된 초전도선재의 전압단자에 따른 전류의존성

Fig. 3. Dependence of critical current of joined superconductor tape on the voltage gap

그림 4는 가압변수에 따른 통전율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 140~500 MPa 정도의 낮은 압력에서는 통전율이 25~65% 정도로 나타났다. 압력이 증가함에 따라 통전율이 증가되어 약 1,600 MPa에서 80~90%로 가장 높은 값을 보이며, 이후 더 큰 압력에서는 통전율이 감소하는 경향을 나타내었다. 낮은 압력에서 통전율이 가장 낮게 나타나는 이유는 미세조직 분석결과 접합부에서 초전도심들이 서로 완전히 접촉되지 않았으며 또한 접촉면이 거의 2223 결정립의 (001)방향으로 국한되었기 때문으로 관찰되었다. 이후 압력이 1,600 MPa로 증가함에 따라 통전율이 향상되는 것은 큰 변형에 의해 초전도심과 초전도심과의 접촉면적이 넓어지고 접촉면이 부분적으로 2223 결정립의 a-b축 방향으로 변환되기 때문으로 판단되며, 또한 단일축압력에 의해 초전도심(core)의 밀도와 2223 결정립의 집합조직이 향상되었기 때문으로 사료된다.

1,600 MPa 이상에서는 압력이 증가함에 따라 통전율이 감소하는데 이는 window 가장자리에 남아 있는 은(Ag)이 초전도심 내부로 침투하면서 코어 부분이 불균일하게 변형되어 초전류의 흐름을 방해하는 현상과 관련이 있는 것으로 사료된다. 또한,

단일축 압력이 증가함에 따라 이 부분에서 발생하는 균열(crack) 또는 미세균열(microcrack)의 크기와 수가 증가할 것으로 예상되며 이러한 균열/미세균열이 소결과정 동안 완전히 치유되지 않은 것으로 관찰되었다. 일반적으로 균열/미세균열은 초전류의 흐름에 대한 weak-link [10]로 작용하여 임계전류를 감소시키는데 이러한 현상은 소량의 액상이 존재하면 회복될 수 있으므로 분말의 조성이나 열처리 조건을 최적화하면 제어될 수 있을 것이다 [11, 12]. 그림 5는 천이부에서(transition area)에서 초전도심 내부로 침투된 은(Ag)의 형상(그림 5(a))과 천이부에서 형성된 균열(그림 5(b))을 나타내었다.

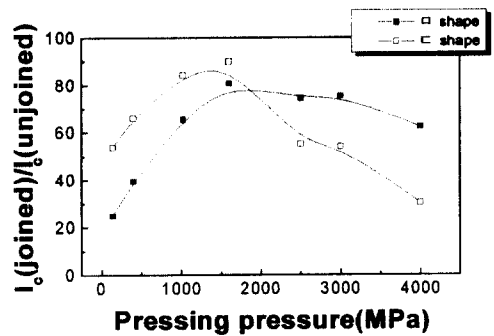


그림 4. 단일축압력에 따른 접합된 초전도 선재의 통전율

Fig. 4. Effect of uniaxial pressure on the ratios of critical current of joined area to unjoined area of superconductor tape

1,600 MPa 이하의 압력에서는 접합부의 형상이 □형의 경우 ㄷ형보다 통전율이 더 낮게 측정되었다. 특히 140 MPa에서는 약 30% 정도 통전율의 차이를 보이다가 압력이 증가함에 따라 통전율의 차이는 점점 작아진다. '□형'의 시편인 경우 'ㄷ형'보다 통전율이 낮은 이유는 접합부 형상에 기인한 것으로 낮은 압력으로 인해서 'ㄷ형'에 비해 초전도심들이 서로 완전히 접촉되지 않고 일부 분리(debonding)되었기 때문으로 관찰되었다.

반면에 1,600 MPa 이상의 압력에서 접합부의 형상이 '□형'인 것에 비해 'ㄷ형'인 경우에는 통

전율의 감소현상이 더욱 크게 나타났다. 이는 'ㄷ형'의 시편에서 은(Ag)이 완전히 초전도심을 감싸 주지 못하여 가압과정 동안에 초전도 분말이 시편 밖으로 밀려 나와 초전도심의 단면적을 국부적으로 감소시키기 때문으로 관찰되었다. 또한 액체 질소가 초전도심 내부로 침입하여 급격한 온도변화로 발생하는 열충격(thermal shock)에 의해 초전도체가 손상을 받은 것으로 추측된다. 그러므로 약 1,600 MPa 정도의 단일축 압력이 접합선재에서 높은 통전율을 갖는 최적가압조건으로 생각된다.

선재 접합공정에서 은을 제거시키는 공정은 소결 후 시편(after sintering)뿐만 아니라 소결 전의 시편(as rolled)에도 적용시킬 수 있다. 소결 후 시편의 경우 부식액에 영향을 받는 정도가 미약해 부식 처리 후 5%이내의 임계전류값의 감소현상이 발생되나 소결 전에 부식처리 한 시편의 경우에는 부식액에 영향을 크게 받아 소결 후 시편에 비해 약 60%정도의 임계전류값의 감소를 보이고 있다. 이는 2223상이 변형을 심하게 받은 초전도 분말상태에서는 bulk상태에서 보다 상대적으로 부식액에 대해 화학적으로 불안정한 것으로 생각된다.

3-3. 접합부의 기계적인 특성

접합부의 기계적인 성질을 파악하기 위해 'ㄷ형'으로 접합한 시편의 인장강도값을 만능시험기로 측정하였다. 접합된 선재에서 접착된 부분만을 140~3,000 MPa의 범위에서 가압하여 소결하였을 때 접합된 시편은 30~60 MPa의 응력에서 파단되었다. 접합공정을 하지 않는 초전도 선재의 인장강도 값은 120 MPa로 측정되었다.

접합시편의 결합강도(bonding strength)정도를 접합하지 않는 선재의 인장강도값에 대한 접합된 선재의 인장강도값의 비율로 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 이 비율은 단일축압력이 140 MPa에서 80%이고 압력이 400 MPa로 증가함에 따라 서서히 향상되며 압력이 1,020 MPa일 때

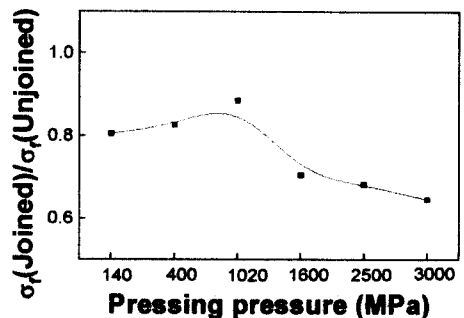


그림 6. 접합된 선재의 단일축압력에 따른 결합강도 비(접합하지 않은 선재에 대한 접합선재의 인장강도 비율) 의존성

Fig. 6. Dependence of the ratio of tensile strength of joined tape to unjoined tape on the uniaxial pressure for lap-joined BSCCO tapes

88%로 최대값을 나타내었다. 압력이 더욱 증가함에 따라 이 비율은 다시 감소하는데, 이는 선재가 높은 압력을 받을 경우 큰 소성변형에 의해 비접합부에 비해서 접합부의 형상(두께, 폭)이 크게 변형되어 경계부분에서 응력이 집중될 수 있으며 또한 접합부내에서 초전도심과 피복재료 사이의 계면이 불규칙하게 변형되어(sausage 효과) 응력집중점으로 작용되었기 때문으로 사료된다.

인장시험으로 파단된 시편의 사진을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 접합된 선재가 기계적인 응력을 받을 경우 접합부와 비접합부가 만나는 천이부분에서 파괴가 일어나는 것으로 관찰되었다. 그러므로 접합된 선재가 기계적 및 열적응력을 받을 경우 시편자체보다도 접합부에서 미세균열이 먼저 생성, 전파되어 임계특성을 저하시키고 궁극적으로 재료가 파단되는 것을 알 수 있으며, 약 1,000 MPa 정도의 단일축압력이 기계적 특성을 고려할 때 적정 압력임을 알 수 있다.

4. 결 론

Bi-2223 선재를 lap-joint 방법으로 접합할 때 마스킹재료는 Nitto tape, 부식액은 암모니아, 과산화수소수, 중류수(7.35 : 7.35 : 1, 12.5 : 12.5 : 1) 혼합액이 가장 효과적인 것으로 나타났다. Lap-joint된 시편에서 임계특성은 천이지역에서 저하되어 시편전체의 임계특성을 감소시키는 것으로 관찰되었다.

‘□형’, ‘ㄷ형’ window로 접합한 시편에서 통

전율은 가압정도(140~4,000 MPa)에 따라 25~90%로 민감하게 변화하였다. 1,600 MPa의 압력에서 통전율은 약 90%로 가장 높게 측정되었는데 이는 초전도심의 밀도와 집합조직이 증가되었으며 접촉계면이 향상되었기 때문으로 판단된다.

접합시편의 결합강도 값은 비접합시편에 비해 10~40%정도 감소하였으며 천이지역의 불균일한 형상/계면에 의한 응력집중으로 이 지역에서 균열이 생성, 전파되어 시편을 파단시키는 것으로 판단되었다. 접합선재의 전기적, 기계적 특성을 고려하였을 때 1,000~1,600 MPa 범위의 단일축가압이 적정압력으로 판단된다.

감사의 말씀

본 연구는 한국과학기술부의 연구비 지원에 의하여 수행하였습니다.

참 고 문 헌

1. Otto A, Masur L. J, Gannon J, Podtburg E, Daly D, Yurek G. J and Malozemoff A. P, IEEE Trans. Apply. Supercond., 3, 915, 1993.
2. Ohkura K, Muka H, Hikata T, Ueyama M, Kato T, Fujikami J and Sato K, 1993 Proc. ISS '93(Hiroshima, 1993).
3. J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, and P. J. Bendnarczyk, IEEE Trans. Mag., 28, March, pp. 946-948, 1993.
4. Hee-Gyoun Lee, Gye-Won Hong, Jong-Jin Kim, Myung-Youp Song, Physica C, pp. 81-84, 1995.
5. Jaimoo Yoo, Hyungsik Chung, Jaewoong Ko, Haidoo Kim, Jian Sha, Physica C, 267, pp. 53-58, 1996.
6. J. Y. Huang, R. Jammy, A. N. Iyer, and U. Balanchandran, Journal of Electronic Materials, Vol. 24, No. 12, pp. 1793-1796, 1995.
7. J. Sha, X. J. Chen, Z. B. Wang, X. S. Ye, Z. K. Jiao, Physica C, 297, pp. 91-94, 1998.
8. M. R. Koblishka, T. H. Johansen, H. Bratsberg, and P. Vase, Supercond. Sci. Technol., 11, pp. 573-576, 1998.
9. G nter Petzow, Metallographic etching,

- American society for metals, pp. 37-39, 1976.
10. Y. Yamada, N. Fukushima, S. Nakayama, H. Yoshino, and S. Murase, Jpn. J. Appl. Phys., 26, L865, 1987.
 11. Hellstrom E. E, 1992 MRS Bull, (August), 45.
 12. J. Joo, J. P. Singh, and R. B. Poeppe, Supercond. Sci. Technol., 6, p.421-428, 1993.