

BSCCO(2223) 초전도 선재의 접합공정 연구

A Study of Joining Method of BSCCO(2223) Tape

김정호*, 김종석*, 김태우*, 지봉기**, 주진호***, 나완수***

Jung Ho Kim*, Joong Seok Kim*, Tae Woo Kim*, Bong Ki Ji**, Jinho Joo***
and Wansoo Nah***

Abstract: We evaluated the effects of joining process such as contact method, shape of joined area and pressure on the electrical and mechanical properties of Bi-2223 superconducting tape. Specifically, the current capacity of the jointed tape was measured as a function of uniaxial pressure, and the thermal shock, bonding strength and strain tolerance of the tape were evaluated and correlated to the microstructural evolution.

It was observed that the current capacity was significantly dependent on the uniaxial pressure. The jointed tape, fabricated with a pressure of 1,000-1,600 MPa, showed the highest value of current capacity results from improvements in core density, contacting area and grain alignment, etc.

In addition, the strength of jointed tape was measured to be 86 MPa, which is about 88% of the unjoined tape's strength. The irreversible strain (ϵ_{irrev}) for the jointed tape was measured to be 0.1%, smaller than that of unjoined tape ($\epsilon_{irrev} = 0.3\%$). The decrease in the strength and irreversible strain for jointed tape is believed to be due to the irregular geometry/morphology of the transition area of the tape.

Key Words: Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O (Bi-2223) superconductor tape, critical current, current capacity, resistance to thermal shock, bonding strength, bending strain, lap-joint, scarf-joint.

1. 서 론

고온초전도 재료의 발견으로 인해 초전도 성질을 다양한 전력기기에 상업적으로 응용하기 위한 연구가 광범위하게 시도되고 있다. 고온초전도 재료가 사용되어질 수 있는 전력기기 분야로는 한류기, 발전기, 모터, 마그네트, 변압기, 송전기 등이 있으며 2010년에는 세계적

인 시장규모가 수백억 달러에 이를 것으로 전망되고 있다[1,2]. 이러한 전력기들이 성공적으로 개발되기 위해서는 특성이 우수한 선재 형태의 초전도 장선이 필요하며, 또한 초전도체와 초전도체 사이의 접합기술이 확립되어야 한다.

전력기기에 요구되는 초전도 선재의 사양은 길이가 약 1 km 이상, 임계전류밀도(critical current density, J_c)값은 약 10^4 A/cm²가 되어야 하며[3,4], 대형 전력기들에는 수 Km의 장선이 필요하다. 그러나 수 km 이상의 긴 초전도 선재를 일반적인 제조방법인 powder-in-tube(PIT) 방법으로 만들기는 쉽지 않으므로 수백 m 급의 장선을 만들어 서로 접합시켜 제조하면 수천 m 급의 장선을 쉽게 얻을 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 초전도 선재의 접합기술이 확립되면 초전도체와 부스바(busbar) 등의 접합에도 응용되어 초전도 선재를 이용한 전력기들의 개발을 가능케 한다.

초전도 선재의 접합에서 중요하게 요구되는 성질은 접합부에서의 통전율과 기계적인 특성이다. 통전율이란 접합하지 않은 선재에 대한 접합된 선재의 임계전류값의 비(ratio)로 나타낸다. 초전도 전력기기를 제조할 때 접합부에서 통전율이 낮게 되면 전체 초전도체의 전류밀도를 감소시키므로 통전율이 우수한 접합기술이 개발되어야 한다. 또한 접합부의 접합강도나 내변형율 특성(strain tolerance)이 낮으면 제조 및 사용 중에 발생하는 기계적·열적 응력으로 인해 접합부에서 파단이 일어날 수 있으므로 접합부의 기계적 특성을 저하시키지 않는 접합방법이 확립되어야 한다.

Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O(Bi-2223) 고온초전도 선재의 접합에 대한 연구는 여러 그룹에서 보고되었으나[5-10], 접합기술의 응용가능성과 중요성에 견주어 볼 때 아직 광범위하게 연구가 되지 않고 있다. 특히 이전의 논문들은 lap-joint와 butt-joint 방법을 이용하여 접합하였는데 가압정도와 열처리 공정변수에 대한 연구가 단편적으로 행하여 졌으며, 특히 lap-joint의 경우 시편전체를 가압하여 통전율을 측정하였으므로 장선의 선재접합에는 적용하기 곤란하다는 단점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 Bi-2223 선재에서 접합부만을 가압하는 공정을 선택하였으며, 접합부의 통전율과 기계적인 특성을 향상시키기 위하여 접촉면적이 넓은 lap-joint와 scarf-joint 방법을 이용하였다. 접합공정에 영향을 미치는 접합부의 형상, 가압압력 등을 체계적으로 파악하고 이러한 공정변수들을 적절히 조절하여 전기적 특성이 우수한 초전도 선재의 접합공정을 확립하고자 하였다. 또한 접합부의 접합강도, 열충격(thermal shock)특성, 내변형율(strain tolerance)특성 등의 기계적인 성질들을 미세조직 및 임계특성과 연관시켜 평가하였다.

* 학생회원 : 성균관대 대학원 신소재공학과 석사과정

** 비 회원 : 성균관대 대학원 신소재공학과 박사과정

*** 정 회원 : 성균관대 부교수

원고접수 : 1999년 4월 16일

심사완료 : 1999년 5월 12일

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 혼합하여 고상반응법(solid state reaction)으로 제조하였다. 하소공정은 대기분위기에서 700-855°C에서 총 24시간, 3회 열처리를 하였으며 이후 대기분위기에서 24시간 동안 탈기처리를 하여 2223 분말을 제조하였다.

합성된 분말은 냉간 정수압(cold isostatic press, CIP)을 가하여 직경 0.42 cm, 길이 8.5 cm 크기의 billet으로 성형하여 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), 압연(rolling)공정을 반복하여 행하였다. 가공 중에 시편의 파단을 방지하고 균일하게 변형시키기 위하여 매 공정시 단면감소율을 약 10-15%로 하였으며 또한 중간소둔(250°C, 30분)을 병행하였다. 최종시편의 두께와 폭은 각각 200 μm, 1.7 mm 이며 소결시간은 840°C, 대기분위기에서 50시간을 열처리하여 초전도 선재를 제조하였다.

PIT 방법으로 제조된 초전도 선재를 접합하는 방법으로는 scarf-joint 방법과 lap-joint 방법을 택하였다. Scarf-joint 방법으로 선재를 접합시키기 위해 두 선재의 끝단을 두께방향으로 약 20° 정도의 경사를 갖도록 연마하고 세척한 후 이들 선재의 경사면을 서로 접촉시켰다. 접촉된 선재의 기계적인 특성을 향상시키기 위하여 접촉부를 은박(Ag foil)으로 감싼 후 단일축 압력을 가하고 840°C에서 50시간 재소결처리를 하였다. Lap-joint 방법은 먼저 초전도 선재를 접착력과 내부식성이 우수한 마스크재료(Nitto tape)로 보호한 후 접촉부 형상 부분만을 과산화수소수, 암모니아, 증류수의 혼합 부식액($\text{H}_2\text{O}_2 : \text{NH}_3 : \text{H}_2\text{O} = 12.5 : 12.5 : 1$)에 노출시켜 피복재료인 은(Ag)의 일부분을 제거하였다. 마스크재료는 아세톤으로 제거하고 에타놀로 부식액을 세척하였다. 노출된 초전도심(core)을 서로 접촉시키고 접촉부분만을 다양한 단일축 압력으로 가하여 840°C, 50시간 재소결처리를 하였다.

임계전류값(critical current)은 4 단자법(fourpoint probe method)으로 77 K, 0 T, 1 μV/cm 기준으로 행하였다. 열충격시험은 시편을 대기에서 액화질소 안으로 빠른 속도로 잠입시킨 후 다시 액화질소 밖으로 이동시킴으로써 상온(300 K)과 액화질소온도(77 K)의 범위에서 열충격을 가하였다. 열충격은 30회 반복하였으며 다섯 사이클 마다 임계전류값을 측정하여 열충격에 따른 임계값의 변화를 평가하였다. 접합강도는 만능시험기(Instron)를 이용하여 측정하였으며, 내변형률특성은 시편에 굽힘변형률(bending strain)을 유도하고 이에 따른 임계전류값의 변화와 연관시켰다. 굽힘변형률은 다양한 반경을 갖는 디스크 형태의 베이커라이트(bakelite)를 이용하여 유도하였으며, 0-1.4%의 변형률 범위에서 측정하였다. 임계전류값, 열충격특성, 접합강도, 내변형률특성 등은 조건당 3-5개의 시편으로부터 측정하여 평균값으로 나타내었다. 미세조직 관찰은 광학현미경(optical microscope)과 주사전자현미경(scanning electron microscope)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

Bi-2223 선재에서 접합부의 통전율과 기계적인 특성을 향상시키기 위해서는 접촉부에서 초전도심(core)과 피복재료와의 계면이 균일하여야 하며, 2223 결정립의 집합성과 연결성이 우수하고 또한 접촉면적이 넓어야 한다. 접촉부의 면적을 증가시키기 위하여 scarf-joint 와 lap-joint방법을 이용하여 선재를 접합하였으며 공정의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)는 scarf-joint 공정으로써 선재의 두께방향으로 20° 정도로 경사되게 연마한 시편을 서로 접촉시키고 가압하는 공정이며, 그림 1(b)는 lap-joint 방법으로써 피복재료를 제거하여(window 형성) 초전도심을 노출시킨 후 서로 접촉시켜 가압하는 공정이다.

그림에서 보듯이 소결처리를 한 접합선재에 각 구간별로 전압단자를 만들어 임계전류값을 측정하여 통전율을 구하였다. 통전율은 서로 접촉되지 않는 선재부분의 임계전류에 대한 접합부를 포함한 시편전체의 임계전류값의 비율 ($I_c(a-f)/I_c(a-b) \times 100$)로 나타내었다. 접합된 선재에서 접촉유무에 따라 접합부분(joined area), 천이부분(transition area), 비접합부분(unjoined area)으로 구분하며, 그림에서 c-d 구간은 접합부분, b-c 와 d-c 구간은 천이부분, 그리고 a-b와 e-f 부분은 비접합부분에 해당한다.

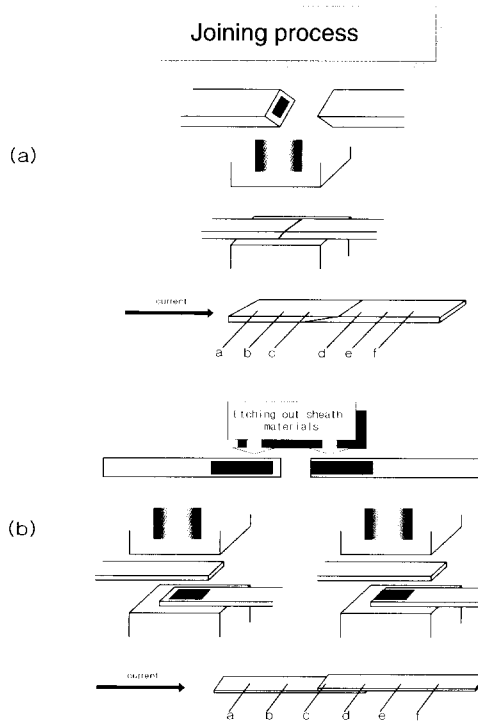
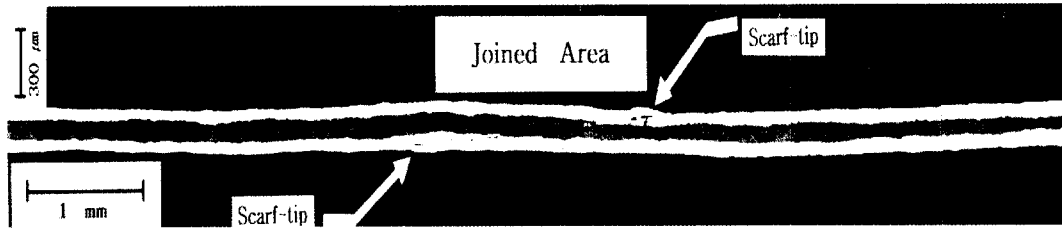


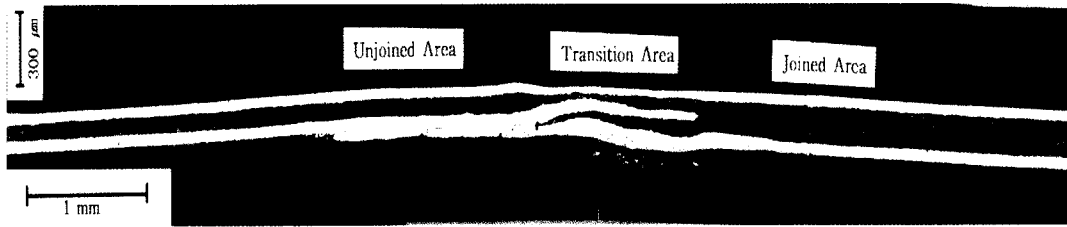
그림 1. Bi-2223 초전도 선재의 (a) scarf-joint 와 (b) lap-joint에 의한 접합공정 개략도.

Fig. 1. Schematic of the (a) scarf-joint and (b) lap-joint processes of Bi-2223 superconductor tape.

두 방법에 의하여 접합되고 300-750 MPa의 압력과 재소결 처리를 한 시편에서 접합부의 횡축 단면사진을 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 scarf-joint 방법에 의한 접촉부 단면사진으로 초전도심과 피복재료사이의 계면이 상대적으로 균일한 것으로 나타났다. 이는 접촉부의 형상이 단순할 뿐만 아니라 선재의 양 끝단이 서로 마주보며 접촉되었으므로 가압공정시 불균일한 변형의 정도가 작기 때문에 사료된다. 이 시편에서의 통전율은 약 68%로 나타났으며 공정은 비교적 간단하지만 접



(a)



(b)

그림 2. (a) scarf-joint 와 (b) lap-joint 방법에 따른 접합된 선재의 광학사진.

Fig. 2. Optical micrographs showing longitudinal cross section of jointed tape processed by (a) scarf-joint and (b) lap-joint method.

측면의 경사를 정확하게 제어하기가 쉽지 않고 다심선 재에 적용할 경우에는 filament 들간에 연결이 어렵다는 단점이 있다.

그림 2(b)는 lap-joint 방법에서 window의 형상을 'ㄱ형'으로 만든 시편의 접촉부 단면사진으로써, 접합부분의 계면은 양호하나 천이부분에서는 상대적으로 불균일하고 특히 피복재료의 일부분이 초전도심 내부로 침투되어 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 초전도심들이 상·하로 접촉된 상태에서 단일축 압력을 받았기 때문으로 판단된다. 통전율은 43%로 낮게 측정되었으나, lap-joint 방법은 다심선재에도 적용하기가 용이한 장점이 있으며 접촉부의 형상과 가압의 정도를 최적화시키면 통전율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 lap-joint 방법에서 접합부의 통전율에 중요한 영향을 미치는 가압변수의 역할과 접촉부의 형상에 따른 통전율의 변화를 파악하기 위해 접촉부의 형상을 'ㄱ형'과 'ㄷ형'으로 달리하고 140-4,000 MPa의 다양한 단일축압력으로 가한 후 소결처리하여 통전율을 측정하였다.

그림 3은 가압변수에 따른 통전율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 낮은 압력(140 MPa)에서는 통전율이 작게 나타났으나 압력이 증가함에 따라 통전율이 증가하여 약 1,600 MPa에서 80-90%로 가장 높은 값을 보이며, 이 후 더 큰 압력에서는 통전율이 감소하는 경향을 나타내었다. 낮은 압력에서 통전율이 낮게 나타나는 이유는 미세조직 분석결과 접합부에서 초전도심들이 서로 완전히 접촉되지 않았으며 또한 접촉계면이 거의 2223 결정립의 (00ℓ) 방향으로 국한되었기 때문으로 관찰되었다. 그림 4는 400 MPa의 단일축 압력을 받은 시편의 단면사진으로써 초전도심들이 완전히 접촉되지 않고 서로 분리되어 있음을 알 수 있다.

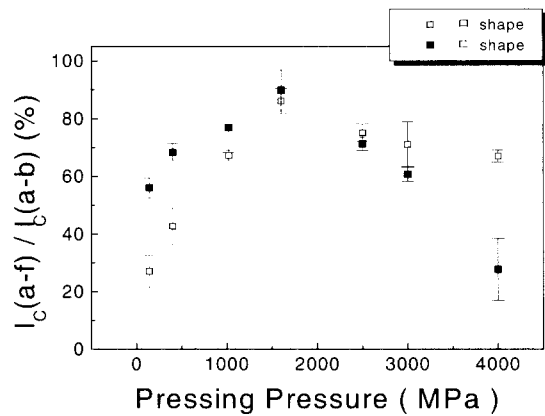


그림 3. 단일축 압력에 따른 비접합부분 ($I_c(a-b)$)과 접합부분 ($I_c(a-f)$)의 임계전류 값의 비(ratio).

Fig. 3. Dependence of the ratios of critical current of whole area ($I_c(a-f)$) to unjoined area ($I_c(a-b)$) on uniaxial pressure.

이후 압력이 1,600 MPa로 증가함에 따라 통전율이 향상되는 것은 큰 변형에 의해 초전도심과 초전도심과의 접촉면적이 넓어지고 접촉계면이 부분적으로 2223 결정립의 a-b축 방향으로 변환되는 현상과 연관이 있는 것으로 생각된다. 또한 단일축압력의 증가에 의해 초전도심의 밀도와 2223 결정립의 집합조직이 향상되어 통전율이 증가되는 것으로 판단된다. 그림 5는 각각 400 MPa(그림 5(a))와 1,600 MPa(그림 5(b))의 단일축

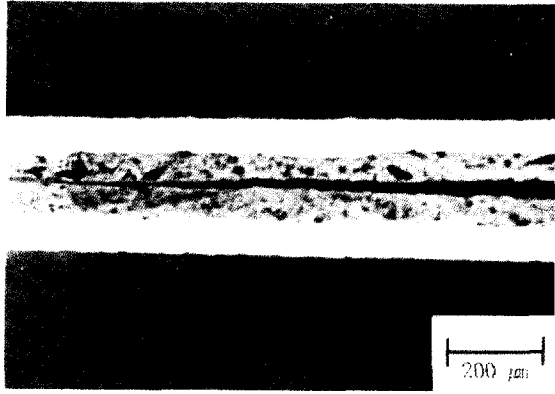
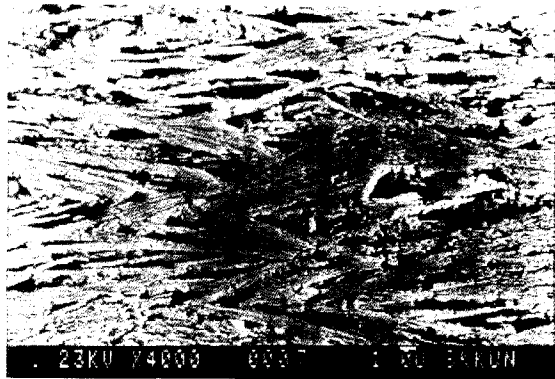
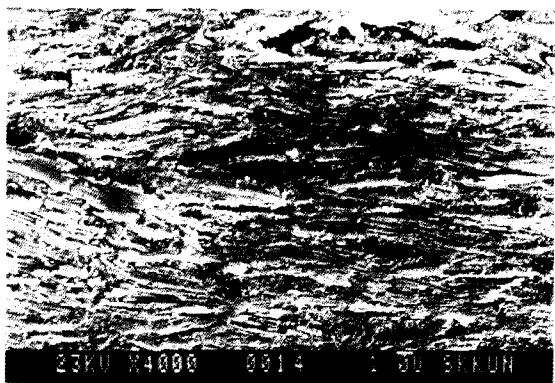


그림 4. 집합된 선재에서 초전도심(core)의 분리현상에 대한 광학사진.

Fig. 4. Optical micrograph of longitudinal cross section of jointed tape showing the debonding of superconductor cores.



(a)



(b)

그림 5. (a) 400 MPa (b) 1,600 MPa의 단일축 압력에 의해 집합된 선재의 집합정도에 대한 SEM 사진.

Fig. 5. SEM micrographs showing the degree of texturing of jointed tape experienced uniaxial pressure of (a) 400 MPa and (b) 1,600 MPa. 압력을 받은 집합부의 단면사진으로써, 압력이 증가함에 따라 2223상의 집합조직이 선재의 길이방향으로 발달되는 것을 나타낸다.

1,600 MPa 이상의 압력에서는 압력이 증가함에 따라 통전율이 감소하는 경향을 나타내는데 이는 높은 압

력에 의해 초전도심과 피복재료사이의 계면의 불규칙성 (sausage 현상)을 심화시키고, 또한 window 가장자리에 남아 있는 은(Ag)이 초전도심 내부로 깊숙이 침투하면서 국부적으로 초전류의 흐름을 방해하는 현상과 관련이 있는 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 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 않으면 초전류의 흐름에 대한 weak-link[11]로 작용하여 임계전류를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그림 6은 1,600 MPa의 압력을 받은 시편에서 집합부의 단면사진으로써 천이 지역에서 발생한 균열이 관찰되는데 일반적으로 균열/미세균열은 소량의 액상이 존재하면 회복될 수 있으므로 분말의 조성이나 열처리 조건을 최적화하면 제어될 수 있을 것이다 [12,13]. 집합부의 통전율을 고려하였을 때 'ㄱ형'과 'ㄴ형' window로 집합한 시편에서 1,000-1,600 MPa의 단일축 압력범위가 최적 압력조건으로 판단된다.

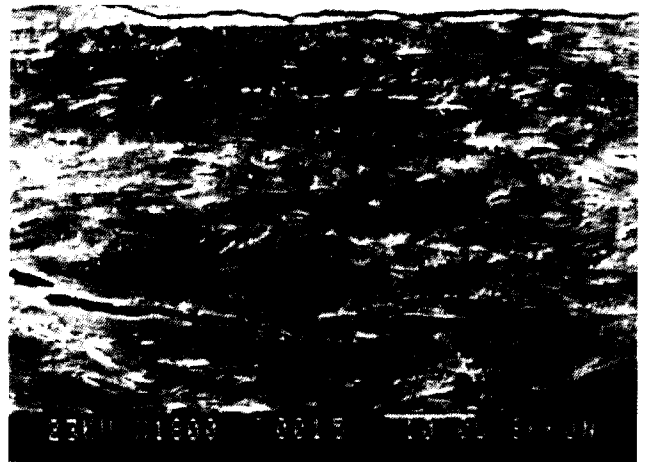


그림 6. 집합된 선재의 천이부분에서 균열의 발생을 보여주는 SEM 사진.

Fig. 6. SEM micrograph of longitudinal cross section of jointed tape showing the induced crack in transition area.

1,600 MPa 이하의 압력에서는 접촉부의 형상이 'ㄱ형'의 경우가 'ㄴ형'보다 통전율이 더 낮게 측정되었다. 이는 'ㄱ형'의 접촉부 형상에 기인한 것으로써 낮은 압력으로 인해 'ㄴ형'에 비해 초전도심들이 서로 균일하게 접촉되지 않고 일부 분리되어있기 때문으로 관찰되었다. 반면에 1,600 MPa 이상의 압력에서 접촉부의 형상이 'ㄱ형'인 것에 비해 'ㄴ형'인 경우에는 통전율의 감소현상이 더욱 크게 나타났다. 이러한 현상은 'ㄴ형'의 시편에서 은(Ag)이 완전히 초전도심을 감싸주지 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.

열충격에 의한 초전도체의 손상정도를 평가하기 위하여 'ㄱ형'과 'ㄴ형' window로 집합한 시편에 반복적으로 열충격을 가하고 임계전류값의 변화를 측정하여 그림 7에 나타내었다. 그림에서 'ㄱ형' 접촉부 형상의 시편은 초기임계전류값이 30회의 열충격을 받아도 변화하지 않는 것으로 나타났다. 반면에 'ㄴ형' 접촉부 형상을 가진 시편에서는 초기임계전류값이 열충격에 의해 서서히 감

소하기 시작하여 30회의 열충격을 받았을 때 약 35%까지 감소함을 알 수 있다. 이는 앞서 설명하였듯이 'ㄷ형' 시편에서는 접합부에서 피복재료가 초전도심을 완전히 감싸주지 못하여 초전도심의 일부가 노출되어 있는 현상과 연관이 있음을 뒷받침 해준다. 즉 초전도심이 액화질소에 직접 노출되어 열충격 및 열피로에 의해 미세조직이 손상되고, 또한 초전도심 내부에 침투되어 갇힌(trapped) 액화질소가 급격한 온도상승에 의해 발생하는 높은 기화압력에 의해 미세조직이 국부적으로 손상될 수 있을 것으로 생각된다[5].

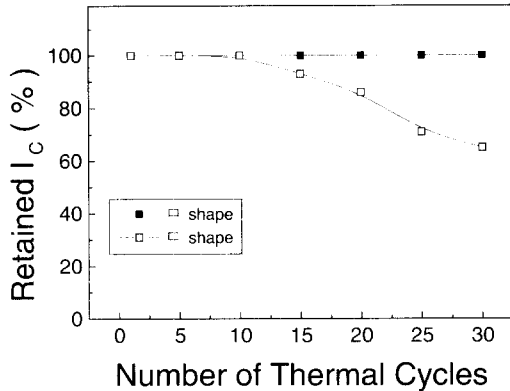


그림 7. 열충격 사이클에 따른 'ㄷ'형과 'ㄱ'형 초전도 선재의 임계전류 값의 변화.

Fig. 7. Dependence of retained critical current of superconductor tape with 'ㄷ' and 'ㄱ' window shape on number of thermal cycles.

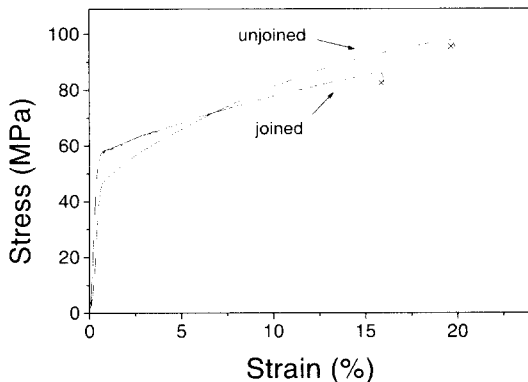


그림 8. Bi-2223 접합선재와 비접합선재의 응력-변형률 곡선.

Fig. 8. Stress-strain curves for both joined and unjoined Bi-2223 superconductor tapes.

접합부의 기계적인 특성을 파악하기 위하여 접합된 시편의 접합강도와 내변형률특성(strain tolerance)을 구하여 접합하지 않은 시편의 특성과 비교하였다. 접합된 시편은 lap-joint 방법에 의해 제조되었으며 'ㄷ형' window 형상으로 1,000 MPa의 압력을 받은 시편을 이용하였다. 그림 8은 접합된 시편과 접합하지 않은 시편의 응력-변형률 곡선을 나타내었다.

접합시편은 접합부와 비접합부 사이의 천이부분에서 파단되는 것으로 관찰되었으며 접합강도가 86 MPa로 나타났다. 접합을 하지 않은 시편의 최대인장강도값이

98 MPa로 측정되어 접합시편의 접합강도는 접합하지 않은 시편에 비하여 12% 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 감소는 접합선재의 천이부분에서 형성된 불균일한 형상과 계면이 응력집중점(stress-concentration/raiser)으로 작용이 되었기 때문으로 사료된다[14].

그림 9는 접합된 시편과 접합하지 않은 시편의 내변형률 특성을 나타내었다. 1.4%까지의 굽힘변형률을 단계적으로 받았을 때 임계전류값의 감소를 나타내었으며, 감소된 정도를 굽힘변형을 받지 않은 초기시편의 임계전류값에 대한 비율(I_c/I_{c0})로 비교하였다. 변형에 따른 임계전류값의 감소는 접합하지 않은 시편에 비하여 접합된 시편에서 전반적으로 더욱 크게 나타났다. 접합하지 않은 시편에서는 임계전류값이 0.3%의 굽힘변형률(ϵ_b)을 받았을 때부터 감소하기 시작하여, $\epsilon_b = 0.4\%$ 에서 $I_c/I_{c0} = 91\%$, $\epsilon_b = 0.6\%$ 에서 $I_c/I_{c0} = 84\%$ 로 감소하고 $\epsilon_b = 1.0\%$ 에서는 $I_c/I_{c0} = 63\%$ 까지 감소하는 것으로 나타났다. 임계전류값의 감소에 대한 비가역 변형률(irreversible strain, ϵ_{irrev})은 약 0.3% 정도임을 알 수 있다. 반면에 접합시편에서는 임계전류값이 $\epsilon_b = 0.1\%$ 에서부터 감소하기 시작하여, $\epsilon_b = 0.2\%$ 에서 $I_c/I_{c0} = 88\%$, $\epsilon_b = 0.4\%$ 에서 $I_c/I_{c0} = 66\%$ 로 감소하고 $\epsilon_b = 1.0\%$ 에서는 $I_c/I_{c0} = 42\%$ 까지 감소하였다. ϵ_{irrev} 는 약 0.1% 정도로 나타나 접합하지 않은 선재에 비하여 상당히 감소한 것을 알 수 있다.

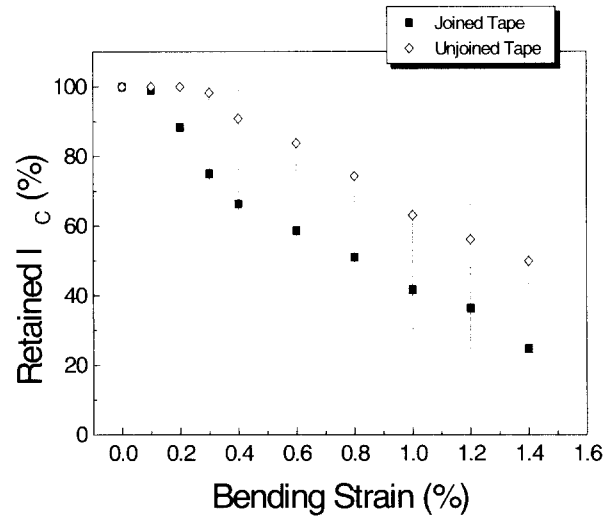


그림 9. 굽힘 변형률에 따른 접합선재와 비접합선재의 임계전류 값의 변화.

Fig. 9. Variations of retained critical current of jointed and unjointed tapes with applied bending strain.

접합시편에서 이와 같은 상대적인 내변형률특성의 감소는 이미 언급한 바와 같이 단일축 압력에 의해 접합부의 형상이 크게 변형되어 접합부분과 비접합부분의 경계(천이)부분에서 시편의 형상이 불균일하게 변형되고, 또한 이 지역에서의 계면이 상대적으로 불균일하여 응력집중현상을 일으키는 현상과 연관이 있는 것으로 판단된다. 즉 불균일점에서의 응력집중은 상대적으로 낮은 변형률에서도 용이하게 균열/미세균열을 형성 및 전파시키고, 초전류에 대한 weak-link로 작용하여 임계전류를 감소시키는 것으로 생각된다.

4. 결 론

Powder-in-tube(PIT) 방법으로 제조한 Bi-2223 선재를 scarf-joint와 lap-joint 방법으로 접합하고, 접합공정변수와 이에 따른 전기적, 기계적 성질의 변화를 평가하였다.

Lap-joint 방법으로 접합한 시편에서 통전율은 단일 축 압력의 정도(140-4,000 MPa)에 따라 25-90%로 민감하게 변화하였다. 1,000-1,600 MPa의 압력범위에서 통전율은 약 80-90%로 가장 높게 측정되었는데 이는 초전도심의 밀도와 접합조직이 증가되었으며 접촉 면적이 향상되었기 때문으로 판단된다. 1,600 MPa의 가압을 중심으로 'ㄱ'형과 'ㄴ'형 window로 접합한 시편에서 통전율이 차이가 나는 것은 접합부의 결합정도, 계면의 균일성, 초전도심의 노출정도 등의 미세조직과 연관이 있는 것으로 관찰되었다. 그러므로 접합선재의 전기적 특성을 고려하였을 때 1,000-1,600 MPa 범위의 단일축가압이 적정압력으로 판단된다.

Lap-joint 방법으로 접합된 시편의 접합강도는 86 MPa로써 접합하지 않은 시편에 비해 12% 정도 감소하였으며, 비가역 변형율(irreversible strain)은 접합 선재에서 0.1%로써 비접합선재의 0.3%에 비해 상당히 감소한 것으로 나타났다. 접합한 선재의 강도 및 내변형율특성의 감소는 전이지역에서의 불균일한 형상과 계면에 의한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] High Tc Information Service, Vol. 6, No. 6, June (1993)
- [2] Joint Communique, 1994 International Superconductivity Industry Summit.
- [3] 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)
- [4] Ohkura K, Muka H, Hikata T, Ueyama M, Kato T, Fujikami J and Sato K, 1993 Proc. ISS'93 (Hiroshima, 1993)
- [5] J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, and P. J. Bendnarczjk, IEEE Trans. Mag., 28, March, p. 946-948 (1993)
- [6] Hee-Gyoun Lee, Gye-Won Hong, Jong-Jin Kim, Myung-Youp Song, Physica C, 242, p. 81-84 (1995)
- [7] Jaimoo Yoo, Hyungsik Chung, Jaewoong Ko, Haidoo Kim, Jian Sha, Physica C, 267, p. 53-58 (1996)
- [8] J. Y. Huang, R. Jammy, A. N. Iyer, and U. Balanchandran, Journal of Electronic Materials, Vol. 24, No. 12, p. 1793-1796 (1995)
- [9] J. Sha, X. J. Chen, Z. B. Wang, X. S. Ye, Z. K. Jiao, Physica C, 297, p. 91-94 (1998)
- [10] M. R. Koblichka, T. H. Johansen, H. Bratsberg, and P. Vase, Supercond. Sci. Technol., 11, p. 573-576 (1998)
- [11] Y. Yamada, N. Fukushima, S. Nakayama, H. Yoshino, and S. Murase, Jpn. J. Appl. Phys., 26, L865 (1987)

- [12] Hellstrom E. E, MRS Bull. (August), 45 (1992)
- [13] J. Joo, J. P. Singh, and R. B. Poeppel, Supercond. Sci. Technol., 6, p. 421-428 (1993)
- [14] 김정호, 김중석, 주진호, 윤대호, 나완수, 김원주, 홍계원, 전기전자재료학회논문지, Vol. 12, No. 4, p. 368-375 (1999)

저 자 소 개



김정호 (金正鎬)

1974년 12월 27일생, 1998년 성균관대학교 금속공학과 졸업(학사), 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정



김중석 (金重錫)

1975년 7월 22일생, 1998년 성균관대학교 금속공학과 졸업(학사), 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정



김태우 (金泰佑)

1972년 5월 9일생, 1997년 성균관대학교 금속공학과 졸업(학사), 현재 동대학원 신소재공학과 석사과정



지봉기 (池奉基)

1972년 8월 17일생, 1997년 성균관대학교 금속공학과 졸업(학사), 1999년 동 대학원 신소재공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 신소재공학과 박사과정



주진호 (朱鎭皓)

1961년 12월 6일생, 1984년 성균관대학교 금속공학과 졸업(학사), 1986년 미국 웨인주립대학교 금속공학과 졸업(석사), 1993년 미국 일리노이공대 금속재료공학과 졸업(박사), 1995 동 대학원 연구원 및 아르곤 국립연구소 객원연구원, 현재 성균관대학교 금속재료공학부 부교수



나완수(羅浣洙)

1962년 6월 14일생, 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1991년~93년 미국 Superconducting Super Collider lab. Guest Collaborator, 1991년~95년 한국전기연구소 초전도응용연구그룹 선임연구원, 현재 성균관대 전기전자 컴퓨터 공학부 부교수