

A Study of Joint Characteristic of BSCCO Superconductor Tape

BSCCO 고온초전도 선재의 접합특성 연구

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

김정호*, 김중석*, 김태우*, 지봉기*, 주진호*, 나완수**

Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

* School of Metallurgical and Materials Science Engineering

** School of Electrical and Computer Engineering

경기도 수원시 성균관대학교, * 금속재료공학부, ** 전기전자컴퓨터공학부

We evaluated the effect of joining process such as contact method, shape of joined area and pressure on the electrical property of Bi-2223 superconducting tape.

It was observed that the current capacity was reduced at the transition area of the joined tape and was significantly dependent on the uniaxial pressure. The lap-joined tape, fabricated with a pressure of 1,000-1,600 MPa, show the highest value of current capacity(80-90%) of the tape itself. It is believed the highest value of current capacity results from improvement in core density, contacting area and grain alignment, etc.

In addition, the irreversible strain(ϵ_{irrev}) for the joined 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 joined tape is believed to be due to the irregular geometry/morphology of the transition area of the tape.

1. 서론

1987년 고온초전도 재료의 발견으로 인하여 초전도 성질을 다양한 전력기기에 상업적으로 응용하기 위한 연구가 광범위하게 시도되고 있다. 특히 고온초전도 재료가 응용될 수 있는 전력기기 분야로는 한류기, 발전기, 모터, 마그네트, 변압기 등이 있으며, 이러한 전력기기를 성공적으로 응용하기 위해서는 초전도 선재의 접합이 필수적이며, 또한 접합한 선재의 경우 접합부에서 전기적, 기계적 및 열적 특성이 우수해야 한다.

전기적, 기계적 및 열적 특성이 우수해야 하는 이유는 초전도 전력기기를 제조할 때 접합부에서 통전율이 낮게되면 전체 초전도체의 전류밀도를 감소시키므로 통전율이 우수한 접합기술이 개발되어야 하고, 접합부의 접합강도나 내변형률 특성이 낮으면 사용중에 발생하는 기계적 응력으로 접합부에서 먼저 파단이 일어날 수 있다. 또한 접

합부의 저항이 높게되면 Joule 열에 켄치현상이 발생되어 접합부의 특성을 감소시키기 때문이다. 따라서 77 K에서 전기적, 기계적, 열적 특성을 파악하고 분석하는 것은 초전도 응용에 앞서서 필수적이다.

Bi-2223 선재의 접합방법으로는 Resistive-Joint, Butt-joint, Scarf-joint, Lap-joint 방법 등이 있다. Resistive-joint 는 이종재료 예를 들면 인듐(In), Wood metal, Pb-Sn 등을 이용하여 선재를 접합하는 방법이다. 하지만 이들 접속 방법으로는 접합저항이 10^{-6} - $10^{-7} \Omega \text{ cm}$ 정도가 되기 때문에 MRI, NMR 같은 영구전류 모드에서는 적용하기가 어려운 단점이 있다[1]. 또한 Butt-joint 와 Scarf-joint 방법은 기계적으로 약하고 많은 filament들을 서로 정확하게 접촉시키기가 어렵기 때문에 다심선재에 적용하기가 곤란하다. Lap-joint 방법은 단심, 다심 선재에 모두 적용할 수 있고 기계적으로 특성이 우수하여 일반

적으로 널리 쓰이는 방법이다[2-4].

그러므로 본 연구에서는 Bi-2223 선재를 Lap-joint 방법을 이용하여 접합부만을 가압하여 접합 선재를 제조하였으며 접합공정에 영향을 미치는 접촉부의 형상, 가압압력 등을 체계적으로 파악하여 접합선재의 전기적, 기계적 특성을 평가하였다.

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 산소 분위기에서 505-835℃까지 여러 단계를 거쳐 총 27시간 하소 처리를 하였으며 이후 CO_2 가 없는 분위기에서 865℃까지 승온시켜 총 100시간 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℃, 30분)을 병행하였다. 최종시편의 두께와 폭은 각각 200 μm , 1.8-2.0 mm 이며 소결시간은 840℃, 대기 분위기에서 50 시간을 열처리하여 초전도 선재를 제조하였다.

PIT(powder-in-tube)방법으로 제조된 초전도 선재의 접합은 먼저 소결된 선재를 마스킹재료(Nitto tape)로 보호한 후 접촉부 형상 부분만을 과산화수소수, 암모니아, 종류수의 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. 노출된 초전도심(core)을 서로 접촉시키고 접촉부만을 다양한 압력으로 가하여 840℃, 50-100 시간 재소결처리를 하였다.

임계전류값(critical current)은 4 단자법(four-point probe method)으로 77 K, 0 T, 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 기준으로 행하였다. 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 변

형을 범위에서 측정하였다. 접합강도는 만능시험기(Instron)를 이용하여 측정하였다. 임계전류값, 내변형률특성 등은 조건당 3-5개의 시편으로부터 측정하여 평균값으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

접합부의 통전율에 중요한 영향을 미치는 가압변수의 역할과 접촉부의 형상에 따른 통전율의 변화를 파악하기 위해 접촉부의 형상을 'm 형'과 'c 형'으로 달리하여 140-4,000 MPa의 다양한 단일축압력으로 가한 후 소결처리하여 통전율을 측정하였다.

통전율은 서로 접촉되지 않는 선재부분의 임계전류에 대한 접합부를 포함한 시편전체의 임계전류값의 비율 ($I_c(a-f)/I_c(a-b) \times 100$)로 나타내었다.(그림 1참조) 접합된 선재에서 접촉유무에 따라 비접합부분(unjoined area, a-b), 천이부분(transition area, b-c), 접합부분(joined area, c-d)으로 구분하였다.

그림 1은 가압변수에 따른 통전율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 'm 형', 'c 형'으로 제조한 접합선재에서 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 접촉면이 거의 2223 결정립의 (00 ℓ)방향으로 국한되었기 때문에 관찰되었다.

이후 압력이 1,600 MPa로 증가함에 따라 통전율이 향상되는 것은 큰 변형에 의해 초전도심과 초전도심과의 접촉면적이 넓어지고 접촉면적이 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[5,6].

1,600 MPa 이상의 압력에서는 압력이 증가함에 따라 통전율이 감소하는 경향을 나타내는데 이는 높은 압력에 의해 초전도심과 피복재료사이의 계면의 불규칙성(sausage 현상)을 심화시키고, 단일축 압력이 증가함에 따라 이 부분에서 발생하는 균열(crack) 또는 미세균열(microcrack)의 크기와 수가 증가할 것으로 예상되며[5,6], 이러한 균열/미세균열이 소결과정 동안 완전히 치유되지

않으면 초전류의 흐름에 대한 weak-link[7]로 작용하여 임계전류를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

판단되고, 불균일한 계면으로부터 발생하는 응력 집중현상도 줄일 수 있을 것이다.

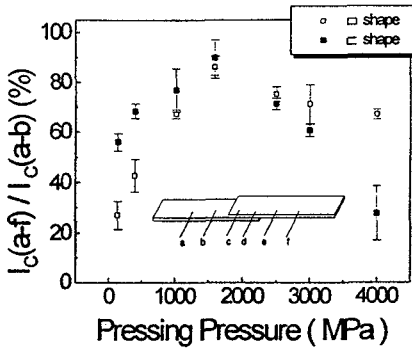
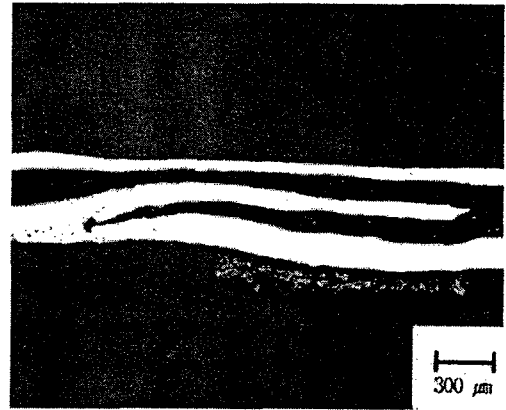


Fig. 1. Dependence of the ratios of critical current of whole area ($I_c(a-f)$) to unjoined area ($I_c(a-b)$) on uniaxial pressure

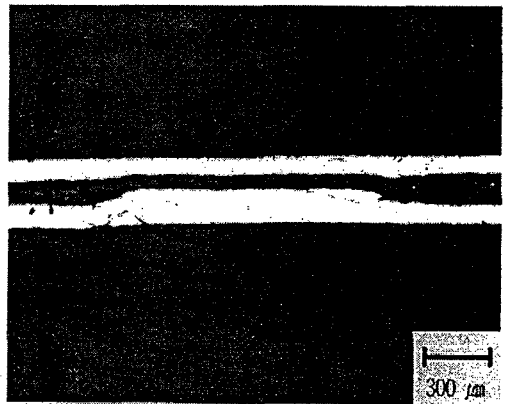
그림 2는 lap-joint 방법에서 window의 형상을 각각 '□ 형' 과 'C 형'으로 만든 시편의 단면사진이다. 그림에서 보는바와 같이 '□ 형'(그림 2(a))인 경우에는 천이부분에서 피복재료의 일부 분인 은(Ag)이 초전도심 내부로 침투한 현상이 보인다. 반면에 'C 형'인 경우에는 '□ 형'에 비하여 상대적으로 은(Ag)의 침투현상이 줄어드는 것으로 관찰되었다. '□ 형'의 경우 천이부분에서 침투된 은을 따라 균열이 발생되며 또한 초전도심이 완전히 접촉되지 않는 현상이 나타나기 때문에 은의 침투현상을 적절하게 제어하면 통전율을 높일 수 있을 것으로 사료되며, 이는 접촉부의 형상에 변화를 줌으로써 유도될 수 있다. 즉, 초전도심 끝부분을 제거하여 공간을 만들어 줌으로써 은이 초전도심내에 침투하지 않고 균일하게 변형되도록 하였다.

그림 2(b)는 'C 형'의 window 형상을 갖는 접합선재로써 은(Ag)의 침투현상이 없고 상대적으로 계면이 더 균일하게 보이며 통전율은 90%로 높게 나타났다.

접합선재의 경우 천이부분이 기존의 보고된 바와 같이 접합부의 특성을 좌우한다[2]. 천이부분에서 계면이 불균일하거나 코어(core)의 면적이 작아지면 초전류가 흐름을 방해받아 임계전류 값의 감소가 발생되고 또한 응력집중 현상도 발생되어 기계적인 특성이 저하된다. 따라서 window 형상이 'C 형'의 경우와 같이 천이부분의 형상이 상대적으로 비접합부분과 비슷하게 균일하면 이 부분과 유사한 임계특성을 갖을 수 있을 것이라



(a)



(b)

Fig. 2. Optical micrographs showing the transition area of joined tapes with (a) '□' and (b) 'C' shaped window

그림 3은 접합된 시편과 접합하지 않은 시편의 내변형을 특성을 나타내었다. 1.4%까지의 굽힘변형을 단계적으로 받았을 때 임계전류값의 감소를 나타내었으며, 감소된 정도를 굽힘변형을 받지 않은 초기시편의 임계전류값에 대한 비율 (I_d/I_{∞})로 비교하였다. 변형에 따른 임계전류값의 감소는 접합하지 않은 시편에 비하여 접합된 시편에서 전반적으로 더욱 크게 나타났다. 접합하지 않은 시편에서는 임계전류값이 0.3%의 굽힘변형 (ϵ_b)을 받았을 때부터 감소하기 시작하여, $\epsilon_b = 0.4\%$ 에서 $I_d/I_{\infty} = 91\%$, $\epsilon_b = 0.6\%$ 에서 $I_d/I_{\infty} = 84\%$ 로 감소하고 $\epsilon_b = 1.0\%$ 에서는 $I_d/I_{\infty} = 63\%$

까지 감소하는 것으로 나타났다. 임계전류값의 감소에 대한 비가역 변형율(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.

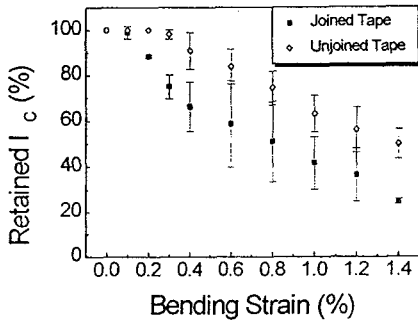


Fig. 3. Variations of retained critical current of joined and unjoined tapes with applied bending strain

접합시편에서 이와 같은 상대적인 내변형율특성의 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 변형율에서도 용이하게 균열/미세균열을 형성 및 전파시키고, 초전류에 대한 weak-link로 작용하여 임계전류를 감소시키는 것으로 생각된다.

접합부의 기계적인 성질을 파악하기 위해 'D형'으로 접합한 시편의 인장강도값을 만능시험기로 측정하였다. 접합시편의 결합강도(bonding strength)정도를 접합하지 않는 선재의 인장강도값에 대한 접합된 선재의 인장강도값의 비율로 그림 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 이 비율은 단일축압력이 140 MPa에서 80%이고 압력이 400 MPa로 증가함에 따라 서서히 향상되며 압력이 1,020 MPa일 때 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 피복재 사이의 계면이 불규칙하게 변형되어(sausage 효과) 응력집중점으로 작용되었기 때문으로 사료된다.

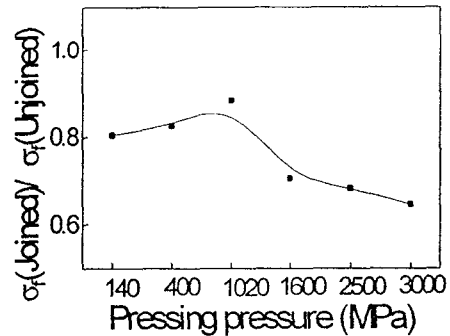


Fig. 4. Dependence of the ratio of tensile strength of joined tape to unjoined tape on the uniaxial pressure for lap-joined BSCCO tape

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. 결론

Powder-in-tube(PIT) 방법으로 제조한 Bi-2223 선재를 lap-joint 방법으로 접합하여, 접합공정변수와 이에 따른 전기적, 기계적 특성을 평가하였다.

'D형', 'C형' window로 접합한 시편에서 통전율은 가압정도(140-4,000 MPa)에 따라 25-90%로 민감하게 변화하였고, 1,600 MPa의 압력에서 통전율은 약 90%로 가장 높게 측정되었다. 또한 window의 형상에 따라서 천이부분의 형상도 각각 다르게 관찰되었다.

Lap-joint 방법으로 접합된 시편의 비가역 변형율(irreversible strain)은 접합선재에서 0.1%로써 비접합선재의 0.3%에 비해 상당히 감소한 것으로

나타났다. 접합한 선재의 강도 및 내변형율특성의 감소는 천이지역에서의 불균일한 형상과 계면에 의한 것으로 생각된다.

접합시편의 결함강도 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.

5. 참고문헌

[1] N. V. Vo, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 188, p. 145-152 (1998)
[2] J. E. Tkaczyk, R. H. Arendt, and P.J.Bendnarczjk, IEEE Trans. Mag.,28, March, p. 946-948 (1993)

[3] Hee-Gyoun Lee, Gye-Won Hong, Jong-Jin Kim, Myung-Youp Song, Physica C, 242, p. 81-84 (1995)
[4] Jaimoo Yoo, Hyungsik Chung, Jaewoong Ko, Haidoo Kim, Jian Sha, Physica C, 267, p. 53-58 (1996)
[5] 김정호, 김종석, 주진호, 윤대호, 나완수, 김원주, 홍계원, 전기전자재료학회논문지, Vol. 12, No. 4, p. 368-375 (1999)
[6] 김정호, 김종석, 김태우, 지봉기, 주진호, 나완수, 한국초전도저온공학회논문지, 10월 예정 (1999)
[7] Y. Yamada, N. Fukushima, S. Nakayama, H. Yoshino, and S. Murase, Jpn. J. Appl. Phys., 26, L865 (1987)