

Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O 초전도 선재의 기계적 특성에 관한 연구

김중석, 지봉기, 김정호, 박형상, 임준형, 주진호, 나완수*
성균관대학교 금속재료공학부, *성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부

A study on the mechanical properties of Bi-(Pb)-Sr-Ca-Cu-O superconductor tape

Joong Seok Kim, Bong Ki Ji, Jung Ho Kim, Hyung Sang Park, Jun Hyung Lim, Jinho Joo and Wansoo Nah

School of Metallurgical and Materials Science Engineering

*School of Electrical and Computer Engineering

Sungkyunkwan University, Suwon, Kyunggi, Korea

jinho@skku.ac.kr

Abstract - The critical current density, J_c , of superconductor tape significantly depends on microstructural evolution during mechanical deformation. In this study, we fabricated Bi-2223 superconductor tape by PIT technique, and investigated mechanical properties of mono- and 61-filamentary tapes and their joined tapes.

The strength of mono-filament tape was higher than those of 61-filament tape, respectively. On the other hand, elongation of mono-filament tape was lower than 61 filament tape.

The joined tapes shows lower strength and irreversible strain than those of unjoined tapes. The reduced strength and irreversible strain for joined tape is probably related to the induced damages such as irregular interface and Ag-intrusion in the transition region which acts as a stress concentration.

1. 서 론

고온 초전도체가 전력기기에 응용되기 위해서는 수 km급의 긴 길이로 제조되어야 하며 임계전류 밀도는 약 10,000 A/cm²정도가 요구된다. 또한 교류전류를 사용할 때 AC loss가 최소화되어야 하며 장시간 안정적으로 사용되기 위해서는 기계적인 특성이 우수하여야 한다.

선재제조와 coil 제작 시 발생하는 응력, 냉매제와 상온 사이에 발생하는 열충격, 고자장내에서 Lorentz force에 의한 응력 발생¹⁾ 등에 의해 초전도체의 임계특성을 저하시키고 궁극적으로 파단을 일으킬 수 있기 때문에 안정적으로 사용하기 위하

여 종합적으로 평가되어야 한다.

본 연구는 Bi-2223의 선재 및 접합 선재에 대한 기계적인 성질을 연구하였다. 인장시험을 통해 응력-변형률 곡선으로부터 응력에 따른 초전도 선재의 기계적인 변형에 대해 관찰했으며, 굽힘 실험을 통하여 임계특성의 변화와 함께 미세조직에 대해 연구를 했다.

2. 본 론

2.1 응력-변형률 곡선 및 파괴형태

Fig. 1은 Bi-2223 bulk, 단심 및 다심(61심) 선재 그리고 순수한 Ag의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 일반적인 예상대로 순수한 Ag의 경우 금속에서와 같은 가공경화 현상과 연성의 특성이 나타났으며 bulk BSCCO에서는 취성의 특성이 나타난 반면에, 단심 및 다심 선재의 변형거동은 이들 Ag와 bulk 특성의 중간으로 나타났다.

단심의 경우는 다심보다 높은 강도값을 나타냈다. 이러한 이유는 복합체에서 기계적인 특성은 구성물질의 형태 및 분율에 밀접하게 변하기 때문에 초전도심의 형태 및 Ag비와 관계가 있을 수 있다. Ag비는 단심은 62.1%인 반면, 다심은 70.6%로 Ag 함유량이 높기 때문에 Ag의 기계적인 영향이 다심의 경우 단심보다 더 크게 받는 것으로 사료된다.

단심과 다심 선재의 응력-변형률 곡선에서 특이한 차이점은 탄성영역에서 소성영역으로 전환될 때 곡선에서의 불규칙적인 변화유무이다. 단심 선재의 경우는 탄성한(elastic limit) 이후 0.5-2%의 변형률 범위에서 응력의 변화가 심하게 나타나서 곡선이 툽니모양으로 불규칙하게 나타나는 반면에 다심 선재에서는 이러한 현상이 관찰되지 않고 있다. 즉, 단심선재에서는 항복점 이후 응력의 변화가 심한 "다중파괴(multiple fracture)²⁾현상"이 관찰되었다.

Fig. 2는 단심과 다심의 접합과 비접합 선재의

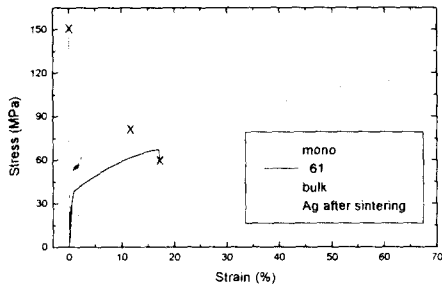


Fig. 1 Stress-strain curves for Bi-2223 bulk, mono- and 61-filamentary tapes and Ag tape

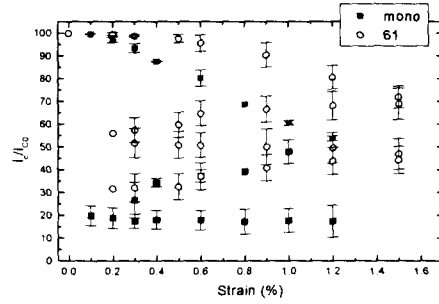


Fig. 3 Variation of retained critical current of mono- and 61-filamentary tapes with applied cyclic bending strain

응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 접합 선재의 경우 비접합 선재보다 기계적인 특성이 낮게 나타났다. 이는 접합된 선재가 기계적인 응력을 받을 경우 접합부와 비접합부가 만나는 천이 부분에서 형성된 불균일한 형상과 계면이 응력집중점(stress-concentration/raiser)으로 작용하여 접합부에 미세균열이 먼저 생성, 전파되어 임계특성을 저하시키고 궁극적으로 재료가 파단 되기 때문이라고 사료된다³⁾.

2.2 굽힘 실험

Fig. 3은 단심 및 다심의 굽힘 변형률(ϵ_b) 특성을 나타내었다. 0~2.5%까지 여러 단계로 굽힘 변형을 받았을 때 임계전류값의 감소를 나타내었으며, 감소된 정도를 변형이 없을 때 초기 임계전류값에 대한 비율(I_c/I_{c0})로 비교하였다.

변형에 따른 임계전류값의 감소는 단심인 경우 다심에 비해 더 크게 관찰되었다. 일반적으로 선재를 열처리할 경우에 초전도심과 Ag의 계면에서 소결을 하는 동안 공정반응을 통해 강하게 결합하기 때문에 변형저항이 높은 것으로 사료된다.⁴⁾⁵⁾

다심의 경우 단심에 비해 굽힘 변형에 대한 저항이 큰 것은 초전도심의 부피가 감소함에 따라 심내의 압축잔류응력이 감소했기 때문으로 추측된다.⁶⁾

굽힘 변형을 주기적으로 반복했을 때 임계전류값의 감소를 나타내었다. 다심 선재는 임계전류값의 변화가 단심보다 작았다. 단심의 경우 3번의 반복을 하면서 90% 감소된 반면, 다심의 경우 4번의 반복을 통해 70% 감소하였다. 이것은 지속적인 변형에서도 다심 내의 초전도심과 Ag의 계면 사이의 결합이 강하기 때문에 단심에 비해서 조금 감소한 것이라고 사료된다.

Fig. 4는 단심의 접합과 비접합 선재의 굽힘 변형률 특성을 나타낸 것이다. 접합 선재의 내변형률특성이 낮았는데 그 이유는 앞에서 언급한 바와 같이 단일축 압력에 의해 접합부의 형상이 크게 변형되어 접합부분과 비접합부분 사이의 천이 부분에서 시편의 형상이 불균일하게 변형되고, 이 지역의 계면이 상대적으로 불균일하여 응력집중현상을 일으키는 현상으로 사료된다.

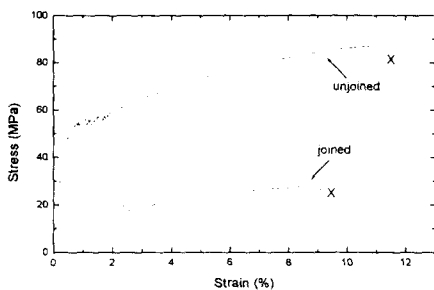


Fig. 2 Stress-strain curves for both joined and unjoined mono-filament tapes

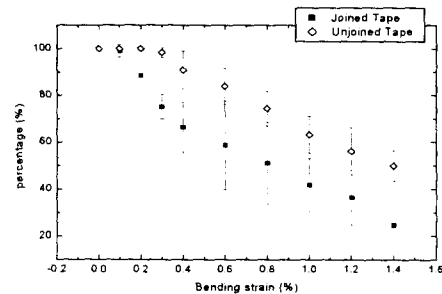


Fig. 4 Variation of retained critical current of joined and unjoined tapes with applied bending strain

3. 결 론

단심과 다심 선재, 그리고 접합과 비접합 선재의 기계적인 특성 평가를 하기 위하여, 인장시험과 굽힘 시험을 하였다. 인장시험에서는 단심이 다심에 비해 높은 강도값을 가졌지만, 변형률은 다심이 단심보다 높았다. 단심의 경우 항복점 이후부터 응력이 불규칙하게 변하는 '다중파괴' 현상이 관찰되었다.

굽힘 실험에서는 다심이 단심에 비해 변형에 대한 임계전류 감소가 작았다. 또한 반복된 굽힘 실험에서도 다심이 단심에 보다 임계전류가 작게 감소했다.

접합선재에서는 비접합 선재에 비하여 강도값이 낮게 나타났다. 이것은 접합선재의 천이 부분에서 형성된 불균일 한 형상과 계면이 응력집중점으로 작용되었기 때문으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- 1) J. W. Ekin, Cryogenics, 35, S25, 1995
- 2) S. Ochiai, K. Hayashi and K. Osamura, J. Mater. Sci., 25, 3467, 1990
- 3) 김정호, 김중석, 주진호, 윤대호, 나완수, 김원주, 홍계원, 한국전기전자재료학회지, 12, 4, 368, 1999
- 4) S. X. Dou, Y. C. Guo, J. Yau and H. K. Liu, Supercond. Sci. Technol., 6, 195, 1993
- 5) H. K. Liu, R. Bhasale, Q. Y. Hu, M. Ionescu, S. X. Dou, and C. Andrikdis, Proceedings of the 7th International workshop on Critical Current in Superconductors, Alpbach, Austria, 561, 24-27 Jan 1994
- 6) S. Ochiai, K. Hayashi and K. Osamura, Cryogenics, 33, 976, 1993