

Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 기계적 특성 평가

하홍수, 이동훈, 양주생, 최정규, 윤진국, 하동우, 오상수, 권영길
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

Evaluation of mechanical properties of Bi-2223/Ag HTS tapes

H.S. Ha, D.H. Lee, J.S. Yang, J.K. Choi, J.K. Yun, D.W. Ha, S.S. Oh, Y.K. Kwon
Applied superconductivity Laboratory,
Korea Electrotechnology Research Institute

hsha@keri.re.kr

Abstract - In most of electrical applications using Bi-2223/Ag HTS tapes, bending and tension stresses are essentially applied to the tape. Therefore, the critical current of the Bi-2223/Ag tape is degraded by increasing the deformation stress, though brittle superconducting filaments are embedded in the reinforced Ag alloy sheath. It is needed to understand bending and tension properties of HTS tapes at room temperature and cryogen to make superconducting magnet, cable and etc. using Bi-2223/Ag HTS tapes. Actually, bending and tension stress applied to the tapes simultaneously, when winding the tapes on former for applications. In this study, the effect of mechanical deformations, bending and tension, on the critical current of Bi-2223/Ag tape was investigated.

1. 서 론

분말충진법(PIT)으로 제조되는 고온초전도체 중 가장 활발히 연구되고 있는 Bi-2223/Ag 고온초전도체는 대부분이 테이프형태의 선재로 제조되어 다양한 응용분야에 이용되고 있다.[1]

하지만 세라믹인 고온초전도체는 특유의 취약함으로 인해 변형이나 취급에 많은 어려움이 따른다. 이러한 문제점은 세라믹 초전도체와 은튜브를 복합화 함으로서 일부 완화될 수 있으며 특히 다심 선재의 경우 필라멘트들을 bundling하는 은튜브를 합금화할 경우 보다 큰 기계적 특성 향상을 이룰 수 있다. 또한 초전도 선재는 단심 보다는 다심으로 제조할 경우 보다 양호한 기계적 특성을 얻을 수 있어 많은 연구자들은 초전도 선재의 필라멘트 수를 늘리는 연구도 주력하고 있다. 초전도 선재의 합금화, 다심화 등으로 인한 특성 변화를 정량적으로 평가하고자 많은 연구가 진행되어 왔으며 주로 상온 및 77 K에서의 인장 및 굽힘에 따른 특성 변화를 관찰하였다.[2-3]

본 논문에서는 고온초전도 선재의 기계적 특성을 개선하고자 은 시스템을 합금화하고 19 ~ 85심 선재를 제조하였다. 제조된 선재는 현재 판매되고 있는 ASC사와 NST사의 선재를 비교하여 특성을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 초전도 선재 제조

열처리 후 Bi-2223상을 생성할 수 있는 전구체 분말을 순은튜브에 충전한 후 가공하여 최종적으로 육각형상의 필라멘트를 제조하였다. 제조된 필라멘트는 기하학적인 구조상 19, 37, 55, 85 심으로 다발(bundling)을 만들어 다심용 합금 튜브에 적층한 후 가공하였다. 이때 다심용 튜브는 Mg 또는 Mn을 첨가한 은합금으로 제조된 것이다. 이후 인발, 신선, 압연 공정을 거쳐 테이프 형상으로 만든 다음 최종 소결 열처리하였다.[4]

2.2 기계적 특성 평가

상온에서 1 Ton 용량의 인장시험기를 이용하여 표점거리 50 mm, 인장속도 3 mm/min, 0 ~ 20 kgf/mm²의 인장응력으로 인장시험을 행하였다. 이때 선재가 인장방향과 평행하지 않을 경우 항복응력보다 낮은 값에서 파단이 일어날 수 있다. 인장 시험 후 변형된 부분을 4단자법으로 임계전류를 측정하여 최초 임계전류와 비교하였다.

극저온에서의 인장변형에 따른 임계전류 변화를 관찰하기 위하여 필라멘트 수가 19 -55개인 초전도 선재를 이용하여 77 K에서 측정하였으며 인장 및 압축변형을 인가할 수 있는 U-자형 치구를 이용하였다. 본 U-자형 치구의 중요한 특징으로는 상온이 아닌 극저온 중에서 *In-situ* 법으로 변형을 인가하면서 임계전류 측정이 가능하고, 또한 인장과 압축변형을 한번에 가할 수 있다. 그리고 0.01 %이하의 미세 변형률(ϵ)인가가 가능하여 보다 정밀한 측정이 가능하며 치구의 양끝을 압축 및 팽창하여 도체에 변형을 인가

하는 방식이다.[5] 본 치구의 변형률 측정은 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며 U-자형 치구의 개략적인 외관을 Fig.1에 나타내었다.

초전도 선재의 인장 변형 특성과 함께 굽힘 변형 특성을 평가하고자 하였다. 직경 80 ~ 20 mm의 원통치구를 이용하여 표면형상을 따라 선재를 굽힘으로서 응력을 인가하여 임계전류 변화를 측정하였다. 굽힘 변형률은 선재 두께에 의존하므로 본 실험에서는 다양한 두께의 선재를 상온에서 변형시킨 후 측정하였다. 그리고 초전도 선재 두께 방향의 굽힘이 아닌 선재 폭방향 굽힘(Edge-wise bending)에 따른 특성도 함께 고려하여 극저온에서 측정하였다.

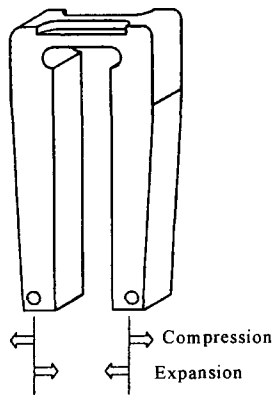


Fig. 1. U-shape sample holder to apply axial strain.

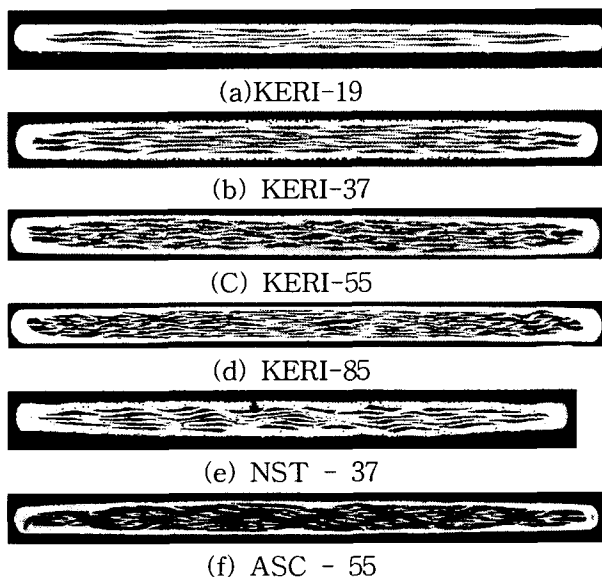


Fig. 2 Cross-section of various Bi-2223/Ag HTS tapes

3. 결과 및 토의

제조된 고온초전도 선재의 단면을 Fig.2에 외국선재와 함께 나타내었다. ASC사 선재의 경우, 필라멘트의 aspect ratio(폭/두께)가 크고 충전률(40 %이상)이 높음을 알 수 있었다.

상온인장 후 임계전류를 측정하여 인장이전의 임계전류와 비교하여 Fig.3에 나타내었다. ASC사 선재의 경우 SUS tape을 선재 양쪽 면에 접합하여 사용하므로 기계적 특성이 매우 우수하여 본 실험에서는 선재만의 상태로 이용하는 NST사 선재와 비교하였다. NST사 선재의 경우 Ag-Mg 합금을 다심용 시스로 사용하여 10 kgf/mm² 까지는 거의 임계전류저하가 나타나지 않았다. KERI-55, 85 선재의 경우 Ag-Mn 합금 시스를 사용하여 16 kgf/mm² 이상의 항복강도를 나타내었으며, 항복강도 직전에서부터 급격한 임계전류 저하가 일어났다. 또한 필라멘트 수가 증가할수록 인장 강도 특성이 향상되었다. 하지만 KERI선재의 경우 약 13 kgf/mm² 이상의 인장강도에서 서서히 임계전류가 저하하는 것을 알 수 있었다. 이것은 초전도 코아 내부에 선재 길이에 수직한 방향으로 미세한 균열이 발생하여 전류 통전경로를 제한하기 때문인 것으로 사료된다.[6] 상온인장 강도는 초전도선재를 이용한 마그네트 또는 케이블 권선시 매우 중요한 기초 자료로 이용될 수 있다.

극저온 하에서 초전도 선재는 통전시 전자력에 의한 hoop stress 또는 열응력에 의한 변형을 받을 수 있으며 이러한 변형 특성을 정량화하고자 U자형 치구를 이용하여 극저온 변형 특성을 측정하였다. Fig.4에 나타낸 선재의 경우 필라멘트 수에 따른 선재의 변형 특성을 나타내었다. 상온인장특성과 유사한 결과로서 필라멘트 수가 증가할수록 변형특성도 향상되었다. 이것은 개수가 증가할수록 필라멘트가 미세해지고 은 시스와 접촉 면적이 증가하여 인장 변형에 따른 도체 전체의 기계적 특성이 향상되기 때문이다.[7]

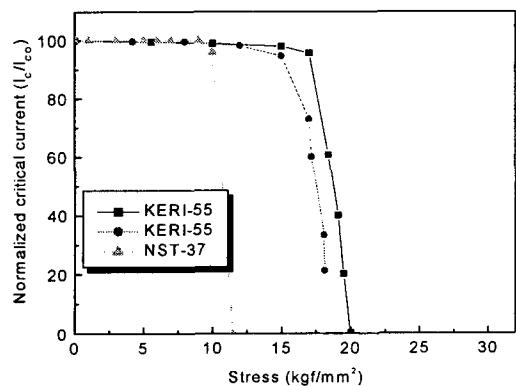


Fig. 3. Stress dependence of the normalized critical current for Bi-2223/Ag tapes

외국의 경우, 필라멘트 개수가 1296인 도체를 제조하여 0.7 %변형률까지 임계전류의 저하가 없는 것으로 보고하고 있다.

각 선재에 대한 선재 두께방향으로 상온굽힘 변형을 측정한 결과 필라멘트수 의존성은 비교적 낮았으며 대신 초전도체의 충전률이 높은 ASC

사 선재의 경우 굽힘변형에 대해 매우 취약하였다. 이것은 충진률을 높임으로 인해 필라멘트간 거리가 짧아져 bridging이 나타날 확률이 높아 지므로 결국 단심과 같은 거동을 나타내는 것이다. Fig.5에 결과를 나타내었으며, 실제로 ASC 사에서는 임계전류가 95 %까지 유지되는 굽힘 직경을 70 mm로 나타내고 있다.

고온 초전도 케이블을 굽힘변형하면 포머에 나선으로 권선된 초전도 선재는 두께 방향 굽힘 변형뿐만 아니라 선재 폭방향으로도 굽힘변형이 일어난다.[8] 이때의 변형을 edge-wise bending이라고 하며 솔레노이드 마그네트 권선 시 마그네트 양쪽 끝 부분에서의 선재가 천이 할 경우에도 선재폭/마그네트원주 만큼의 폭방향 굽힘이 일어난다. 폭방향 굽힘에 대해 선재는 매우 취약하여 적은 변형에도 임계전류는 저하한다.

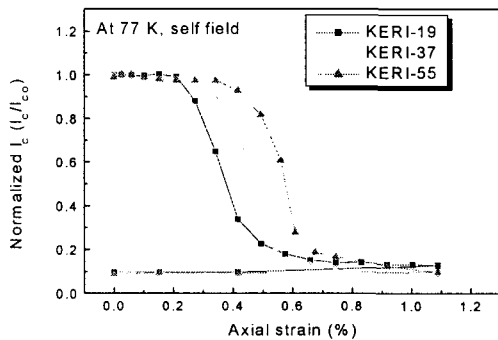


Fig. 4. The effect of number of filaments in the axial strain-I_c measurement.

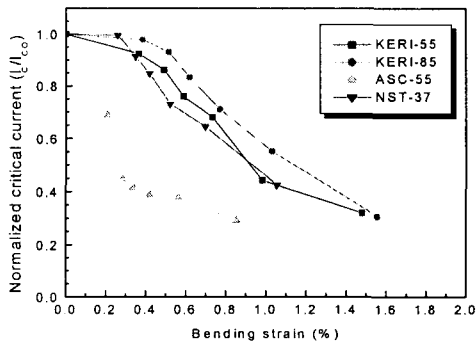


Fig. 5. The influence of bending strain on normalized critical current.

Fig.6에 나타낸 결과는 ASC사 선재와 KERI-55선재를 비교한 것으로 각각의 선재 폭이 4.0 mm, 3.65 mm 였다. ASC사 선재의 경우 두께 방향 굽힘 특성처럼 급격한 특성 저하를 나타내지는 않았지만 필라멘트간 bridging과 필라멘트의 aspect ratio(폭/두께)가 커서 폭방향 굽힘에 대한 선재 특성저하가 급격하였다.

변형에 의해 임계전류가 급격히 저하한 선재

를 SEM으로 관찰 한 결과 Fig.7과 같이 필라멘트용 은시스를 사이에 두고 필라멘트 간 균열이 전파되는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 균열은 초기에 여러 곳에서 미세한 균열로 발생하여 약간의 임계전류 저하를 일으키고 변형 응력이 증가할수록 점차 균열이 발달하여 이웃 필라멘트에 전파되므로 인해 급격한 임계전류 저하를 일으킨다. 균열이 발생하는 원인으로서는 결정립 사이의 공극, 불순물, 초전도체와 은시스간의 계면 등이 있으며 따라서 초전도 코어의 밀도를 증가시키고 이차상 등의 생성을 억제하고 은시스의 강도를 향상시킬 필요가 있다.

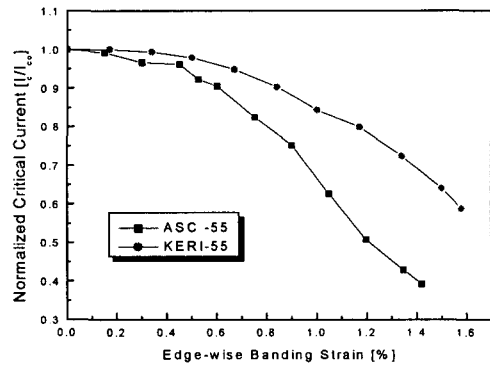


Fig. 6. Dependence of critical current on edge-wise bending(applied at 77 K)

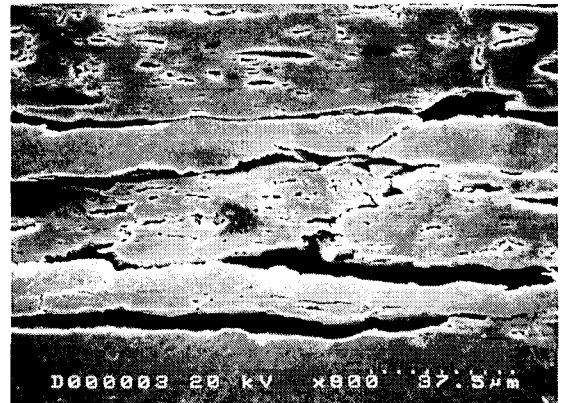


Fig.7 Microstructural cracking between the superconducting filaments.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참고 문헌]

[1] P.Vase, R.Flukiger, M. Leghissa, B. Glowacki " Current status of high-T_c wire" Supercond. Sci. Technol. 13, R71-R84, 2000

- [2] K. Katagiri, H.S. Shin, Y. Shoji, N. Ebisawa, K. Watanabe, K. Noto, T. Okada, M. Hiraoka and S. Yuya, "Tensile strain/transverse compressive stress dependence of critical current in Ag-sheathed Bi(2212) 7-core superconducting wires" *Cryogenics*, Vol. 36, pp491-494, 1996
- [3] N. Vasanthamohan, J.P. Singh and K.A. Lubke, "Strain tolerance of Ag-sheathed BSCCO(2223) superconductors with various geometrical configurations", *Supercon. Sci. Tech.*, Vol. 11, pp584-589, 1998
- [4]. H.S.Ha, S.S.Oh, D.W.Ha, H.M.Jang, S.C.Kim, K.J.Song, C.Park, Y.K. Kwon, K.S.Ryu, "Fabrication of 250 m class Bi-2223/Ag HTS tapes", *Progress in supercond.* V.3, pp.130-133, 2001
- [5] B. ten Haken, A. Godeke, H.J. Schuver and H.J.,ten Kate, "Descriptive model for the critical current as a function of axial strain in Bi-2212/Ag wires", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 32, No. 4, pp2720-2723, 1996
- [6] K.Osamura, M.Sugano, "Mechanical property of mono- and multi- filamentary Bi2223 tapes" seminar in KERI, 2001
- [7] 하홍수, 오상수, 하동우, 심기덕, 김상철, 장현만, 권영길, 류강식, "Bi-2223/Ag 고온초전도 선재의 변형에 따른 임계전류 특성" *전기전자재료 학회지*, V.14, pp.69-73, 2001
- [8] H.S.Ha, S.S.Oh, D.W.Ha, Y.K.Kwon, K.S.Ryu, "The influence of hard bending strain on Bi-2223/Ag tapes", The abstract of 2001 Japan-Korea joint workshop, V.1, pp.196, 2001