

고온초전도 PIT선재의 반복 열응력 및 변형을 의존성

하홍수, 이동훈, 최정규, 양주생, 황선역, 김상철*, 하동우, 오상수, 권영길
한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 넥상스코리아 기술연구소*

Dependence of thermal cycling and axial strain on HTS PIT tapes

H.S.Ha, D.H.Lee, J.K.Choi, J.S.Yang, S.Y.Hwang, S.C.Kim*, D.W.Ha, S.S.Oh, Y.K.Kwor
Applied Superconductivity Group, Korea Electrotechnology Research Institute
R&D center, Nexans Korea Co*.

hsha@keri.re.kr

Abstract - The effect of axial strain and thermal cycling on the critical current is investigated for the Bi-2223/Ag PIT tapes. The axial strain was applied to the tapes by the U-shape sample holder. Two kinds of Bi-2223/Ag tapes with different Ag sheath are used to know the effect of sheath alloying for the tensile strain. The influence of thermal cycling between room temperature and 77 K on critical current are examined. Critical current is drastically decreased for Ag/alloy and Ag/alloy/alloy sheathed tapes at tensile strain above 0.22% and 0.3%, respectively.

1. 서 론

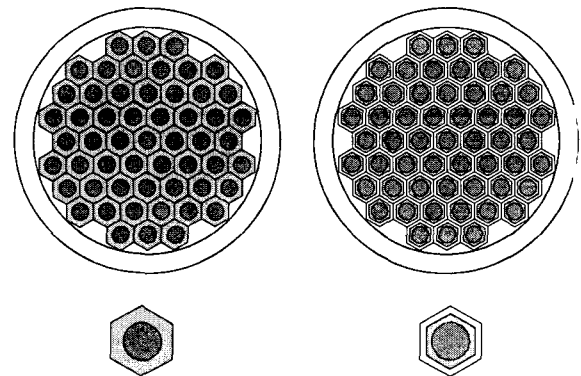
분말충진법(PIT)으로 제조되는 Bi-2223/Ag 고온초전도체는 테이프형태의 선재로 다양한 응용분야에 이용되고 있다. 대부분 다양한 기계적 변형을 받으며 응용기기에 적용된다. 따라서 Bi계 PIT 선재의 경우 인장 변형에 따른 임계전류 의존성에 관한 연구가 다수[1-4] 있었으며 주로 상온인장응력 및 변형에 따른 임계전류 변화를 관찰하였다. 초전도 선재는 마그네트와 같은 응용시 다양한 변형을 받게 되는데 주로 냉각에 따른 열수축 변형, 동작 중 발생하는 후프 스트레스 그리고 마그네트 권선시 발생하는 상온 변형 등이 있다. 또한 전류 도입선 응용의 경우 반복 열응력에 의한 선재 열화도 고려되어야 한다.

현재 상용화된 Bi계 초전도 선재의 경우 대부분이 단심 필라멘트에는 순은 튜브를 이용하고 다심용으로 합금튜브를 이용하고 있다. 기계적 특성 향상을 위하여 기존의 순은 단심 필라멘트에 합금 튜브를 이용하였으며 변형에 따른 임계전류

변화를 비교하였다. 본 논문에서는 이러한 다양한 변형에 대한 정량적인 평가를 위하여 U-자형 치구를 이용한 인장변형 특성을 평가하였다. 그리고 선재변형에 따른 온도의 영향 및 반복 열응력에 의한 영향도 함께 조사하였다.

2. 실험 방법

PIT법으로 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 제조하였다. 이때 튜브 재료에 따라 단심 필라멘트의 경우 기존의 순은튜브를 이용한 경우와 순은 튜브와 Ag-Mg합금튜브를 Clad한 2종류의 선재를 제조하였으며 다심 튜브의 경우 모두 Ag-Mn 합금을 이용하였다. 단심 필라멘트용 시스템은 순은 튜브로만 하였을 경우 기계적 강도가 약하므로 이것을 개선하기 위하여 Fig.1의 (b)와 같은 배열의 단면을 가진 초전도 선재를 제조하였으며 기계적 강도를 비교하였다. 선재의 은비(Ag/SC)는 2.2 ~ 2.4 이었으며 단면 크기는 두께 0.24 mm, 폭 3.9 ~ 4.0 이었다.



(a) Ag/alloy type (b) Ag/alloy/alloy type
Fig.1. Schematic drawing of different cross-section geometries.

두 가지 선재를 먼저 상온 변형한 후 77 K에서 임계전류를 측정하였으며 점차 인장 변형량을 증가하면서 측정하였다. 그리고 동일한 변형량을 77 K에서 부과하여 변형시점의 시편 온도에 따른 특성을 관찰하였다. 이후 변형되지 않았을 때 임계전류의 95%를 유지하는 변형량을 인가한 후 77K와 상온을 번갈아가며 열응력을 인가하여 임계전류 변화를 알아보았다.

3. 결 과 및 토 의

고온초전도 선재를 극저온으로 냉각하면 수축이 일어나므로 상온에서의 변형과 극저온에서의 변형에 따른 임계전류 특성이 차이를 알아보았다. 먼저 상온변형의 경우 상온에서 선재를 인장변형한 후 액체질소온도에서 임계전류를 측정하고 다시 상온으로 가열한 후 다시 인장변형을 인가하는 방식으로 실험을 하였다. 그리고 극저온 인장 변형의 경우는 계속해서 극저온(77K)상태에서 인장변형을 인가하면서 실험하였다. Fig.2.는 기존방식의 선재를 이용하여 상온과 극저온 변형에 따른 결과를 나타내었다. 온도에 따른 변화는 거의 없었다. 이것은 초전도 상이 생성되는 온도가 약 830 ~ 840 °C이므로 이후 상온으로 냉각된 선재는 근본적으로 압축응력을 받고 있는 상태이므로 다시 -196°C로 냉각되어도 초전도 특성에 큰 차이가 없는 것으로 이미 보고 된 결과[2]와 일치하였다.

이후 초전도선재의 종류에 따른 인장변형 특성을 알아보았다. 극저온(77K)에서 연속적으로 변형을 인가하면서 임계전류변화를 측정하여 Fig.3.에 나타내었다. 초기 임계전류의 약 95% 유지되는 영역까지는 거의 비슷하게 거동하지만 이후 Ag/alloy 시스 선재의 경우 급격한 임계전류 감소를 나타낸다. 하지만 Ag/alloy/alloy 시스 선재의 경우 변형률 0.32%까지 초기 임계전

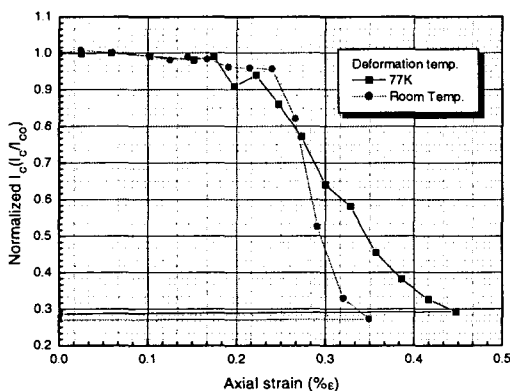


Fig. 2. Dependence of deformation temperature on critical current for Ag/alloy type PIT tapes.

류의 90%이상을 유지하는 우수한 내변형 특성을 나타내었다. 이것은 Ag/alloy/alloy 시스가 상대적으로 항복강도 및 탄성계수가 크기 때문인 것으로 사료된다. 또한 변형인가 전 수축률이 상대적으로 크므로 인해 동일한 인장변형이 가해지더라도 실제 초전도체에 부과되는 인장변형은 상대적으로 적기 때문이다.

상온에서의 인장변형에 따른 초전도 선재의 특성변화를 알아보기 위하여 먼저 일방향으로 변형을 인가한 경우와 인장변형과 회복을 반복한 경우를 비교하여 Fig.4.에 결과를 나타내었다. 변형 및 회복을 반복한 경우 처음부터 임계전류 저하가 나타났으며 0.13%이상의 변형률 하에서는 보다 급격한 임계전류저하가 나타났다. 하지만 연속적으로 변형을 인가한 경우에는 0.25%변형률까지 임계전류의 90%이상을 유지하고 있었다. 결국 미소한 변형이 인가되더라도 인장과 압축이 반복될 경우 훨씬 임계전류 저하가 크다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 초전도체와 은시스간의 기계적 특성차이로 인해 반복변형이 가해질 경우 계면의 분리가 일어나고[3-4] 결국 초전도체의 균열전파를 가속화 시키는 것이다.

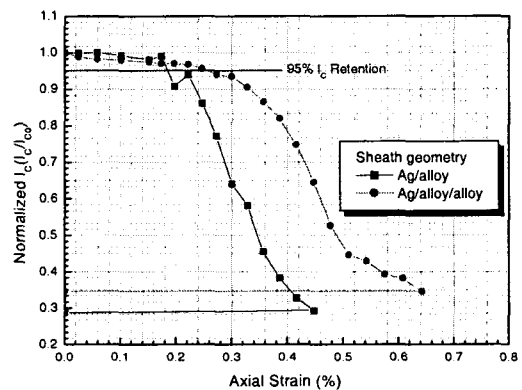


Fig. 3. The influence of sheath material on the axial strain vs. normalized critical current for PIT tapes.

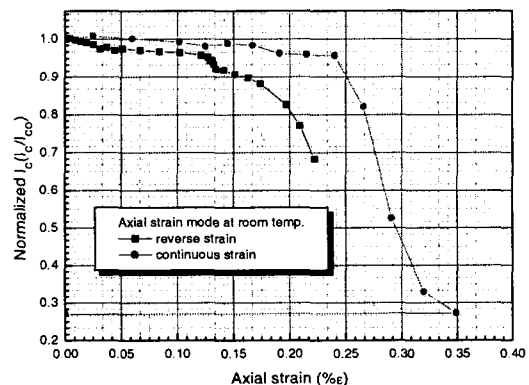


Fig. 4. Normalized critical current vs. axial strain with different strain mode.

반복변형에 의한 초전도 특성저하 이외에도 일정한 변형이 인가된 후 상온과 액체질소온도를 번갈아가며 열응력을 가해 특성 변화를 알아보고자 하였다. 먼저 변형이 인가되지 않았을 경우 거의 임계전류 저하가 나타나지 않으므로(4) Fig.3.의 결과를 고려하여 초기 임계전류의 94%가 되도록 인장변형을 인가한 후 열응력을 가하였다. 열응력을 상온과 77K로 번갈아가며 인가하였으며 20회 이내로 하였다. Fig.5.는 시스재료에 대한 thermal cycling 특성을 나타내었으며 초기 인장변형을 가한 후 thermal cycling 횟수에 따라 점차적으로 특성이 저하함을 보여준다. 시스재료에 대한 특성 변화는 크지 않았지만 Ag/alloy/alloy 시스선재가 보다 완만한 기울기로 저하됨을 알 수 있었다. 초전도체와 은시스간의 열팽창 계수차로 인해 thermal cycling 횟수가 증가할수록 응력이 증가되고 초전도체의 균열 및 변형에 의해 응력이 해소되면서 임계전류도 함께 저하하는 것으로 생각된다. Fig.6.에서 초전도 선재를 변형한 후 다시 원상태로 하였을 경우 임계전류가 회복 또는 저하가 일어나는지 알아보았다. 미소한 인장변형에도 임계전류는 회복되지 않았으며 변형된 상태에서 측정된 임계전류 값을 변형을 제거한 후에도 그대로 유지되었다.

3. 결 론

은시스 종류가 다른 두 종류의 Bi-2223 PIT 선재를 이용하여 인장변형 특성을 평가하여 다음의 결론을 얻었다. 변형시 시편온도는 초전도 특성에 거의 영향을 미치지 않는다. 단심 필라멘트에 합금시스를 사용하여 0.3%변형률에서 거의 95% I_c 가 유지되는 우수한 인장변형 특성을 나타내었다. 95% I_c 에서 18회 thermal cycling하였을 때 임계전류는 완만히 저하하였고 최종적으로 85% I_c 정도를 유지하였다. 반복 변형에 따라 임계전류는 회복되지 않으며 인장변형 후 측정된 임계전류와 같았다.

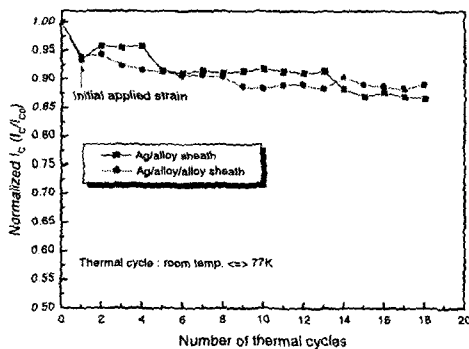


Fig. 5. Normalized critical current vs. number of thermal cycles for Bi-2223 PIT tapes.

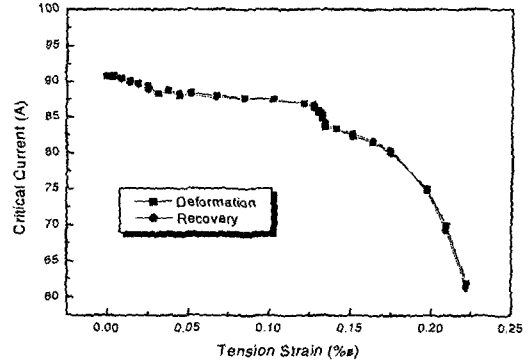


Fig.6. Tension strain vs. I_c of Ag/alloy PIT tape after deformation and recovery.

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

[참 고 문 헌]

- [1] HJN van Eck, L Vargas, B ten Haken and HHJ ten Kate, "Bending and axial strain dependence of the critical current in superconducting BSCCO tapes", Supercond.Sci.Technol., Vol.15, pp1213-1215, 2002
- [2] M Rabara, N Sekimura, H Kitaguchi, P Kovac, K Demachi and K Miya, "Tensile properties and probability of filament fracture in Bi-2223 superconducting tapes", Supercond. Sci. Technol., Vol.12, pp1129-1133, 1999
- [3] H Kitaguchi, J Nishioka, T Hasegawa, K Itoh, H Kumakura, K Togano, and H Wada, "Effect of strain on the critical current of Bi-2223/Ag tapes", IEEE Trans. App. Supercon., Vol.12, No.1 pp1141-1144, 2002
- [4] L Martini, F Barberis, L Bigoni, F curcio, and R Berti, "Low-loss HTS current leads for magnet applications", IEEE Trans. App. Supercond., Vol.12, No.1 pp1297-1300, 2002