

고온초전도 PIT 장선재 제조 및 특성 평가

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

Fabrication and evaluation of superconducting properties of HTS PIT long tapes

Hong-Soo Ha, Dong-Hoon Lee, Joo-Saeng Yang, Sun-Yuk Hwang, Jung-Kyu Choi, Sang-Chul Kim*,
Dong-Woo Ha, Sang-Soo Oh, Young-Kil Kwon
KERI, NexansKorea*

Abstract

Bi-2223/Ag HTS wires have been fabricated by the PIT(powder in tube)process. Intermediate annealing was carried out to increase the homogenization and uniformity of the superconducting filaments embedded in the silver matrix during the deformation process that is important to sustain the engineering critical current density in long superconducting wire. Intermediate annealing act to release the deformation hardening of the superconducting wires during drawing process. Rolling parameters were investigated to roll the superconducting tapes with uniform thickness, width and winding tensions. Critical current of 60 m long superconducting tapes was measured 54.3 A continuously after final sintering heat treatment. The phase analysis of Bi-2223/Ag superconducting tapes are examined by the XRD.

Key Words : Bi-2223/Ag HTS, PIT, Engineering critical current density, annealing, filament

1. 서론

현재 응용분야에 사용되고 있는 대부분의 고온 초전도 선재는 Bi계이며 특히 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재는 상용화되어 판매되고 있다. 고온초전도 선재는 세라믹인 고온초전도체와 부드러운 은이 복합화된 것으로서 선재화 가공시 상호 기계적 특성차이가 커서 단면 불균일성이 나타나기 쉽다[1]. 이러한 단면 불균일성은 초전도 특성을 높이기 위한 방법 중 하나인 고 다심화에 악영향을 미쳐 소재 및 단선이 나타나기 쉽다. 가공 불균일성을 억제하기 위해서는 가공도중 은시스의 가공경화를 풀어주거나, 은시스의 합금화 또는 초전도 분말 균일충진 등이 있다. 또한 초전도 선재로 가공하기 위해 사용되는 방법인 인발, 신선 및 압연 등의 가공 공정제어가 중요하다. 특히 선재 길이방향의 균일

성 확보를 위해서는 선재 직경, 두께 및 장력을 일정하게 유지하여야한다.[2]
초전도 선재의 특성을 나타내는 가장 일반적인 것은 임계전류(I_c)를 초전도선재의 전체단면적(Area)으로 나눈 공칭임계전류밀도(Engineering critical current density, J_e)이다. 공칭임계전류밀도는 초전도선재를 이용한 응용기기 제작시 기기의 크기 및 성능을 좌우하는 매우 중요한 항목이다. 공칭임계전류 밀도를 증가시키기 위하여 임계전류 밀도를 향상시키는 방법이 있지만 이것은 초전도체의 고유한 성질로서 한계가 있으므로 본 논문에서는 초전도 선재 전체 단면적을 줄이고자 하였다. 초전도 선재의 가공성을 향상시켜 은의 면적을 줄이고 초전도체의 길이방향 균일성을 높이고자 인발가공 중 중간어닐링을 하였으며 각 공정별 주요한 항목에 대해 실시시간으로 관리하였다.

2. 실험

Merck사에서 구입한 Bi-2223 전구체 분말과 은 튜브를 이용하여 단심 초전도 선재를 제조하였다. 단심 인발공정을 거쳐 육각필라멘트를 제조하였다. 이후 55개의 필라멘트를 합금 은 튜브에 적층 후 다심 인발하여 최종 직경 1.45 ~ 1.23 mm 까지 인발하였다. 이때 인발도중 은시스의 가공경화로 인한 단선을 방지하고자 선재를 주기적으로 어닐링열처리 하였다. 제조된 선재는 본 소결열처리 전에 산소감압분위기하에서 전열처리를 행하였다. 그리고 인발 도중에 발생할 수 있는 선재의 단면 불균일성을 알아보고자 로드셀을 이용하여 선재에 부과되는 인발력을 측정하였다. 이후 선재의 단면을 잘라서 측정된 인발력 데이터와 위치별로 비교하였다.

장선재를 제조하기위하여 선재 단면 감소율에 따른 길이 변화를 측정하여 향후 1 km 급 선재 제조를 위한 자료로 활용하고자 하였다. 이때 전체 부피변화는 결국 선재내부의 분말밀도의 변화를 나타내는 것으로 초전도 특성에 영향을 미칠 것으로 사료된다. 60 m 길이로 신선된 선재는 균일압연가공을 위하여 pay-off, take-up 부의 선재 장력을 조절하였으며 압연 후 선재의 두께 및 폭 크기를 측정하였다. 선재 두께의 경우 초전도 코어의 두께와 직결되어 열처리 후 초전도체의 배향성 및 연결성에 영향을 미치므로 매우 중요하게 제어되어야 할 항목이다.

Bi-2223/Ag 고온초전도 PIT선재는 Bi-2212가 주상(主相)으로 이루어진 평균입경 1 μm 의 전구체 분말을 이용하여 제조된다. 따라서 주상인 Bi-2212와 기타 2차상의 조성 및 상 분포 등에 따라 최종 초전도 특성이 크게 달라질 수 있다. 따라서 이러한 성분들을 최종 소결 열처리시 용이하게 원하는 상으로 바꾸기 위한 방법으로 전열처리를 실시하였다. 전열처리 조건으로는 진공 또는 저산소분위기에서 760 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 온도범위에서 10시간 이내로 실시하였다.[3] 전열처리 된 선재를 최종 소결 열처리한 후 연속 임계전류 측정 장치를 이용하여 임계전류를 측정하였으며 전열처리 효과를 비교하였다. 또한 XRD를 이용하여 선재 단면의 초전도상 및 2차상들의 분포를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

PIT법을 이용하여 Bi-2223/Ag 고온초전도 장선재를 제조하기위하여 기존의 솟샘플을 제조하기위한 가공 공정과는 달리 가공도중 선재 길이방향에 대한 균일성을 측정하고 또한 균일하게 유지하는 것이 중요하다. 분말이 충전된 단심 선재를 가공, 적층하여 다심 빌렛을 만든 후 인발 가공시 선재의 단면 형상과 인발력을 측정하여 비교하였다. 그림 1.과 2.에서 선재 길이방향에 대한 인발력을 측정하고 실제 단면을 비교하였다. 중간어닐링을 하지 않은 경우 인발력의 편차가 크며 중간어닐링을 실시한 선재의 경우 인발력이 균일하게 작용하였다. 이것은 결국 인발시 인발력은 은시스에만 부과되고 브릿징이나 미세징에 의해 은시스의 단면적이 불균일할수록 인발력은 불균일하게 됨을 알 수 있다. 장선재의 경우 선재 길이방향의 단면균일성이 매우 중요하므로 중간어닐링은 필수적임을 알 수 있었다.

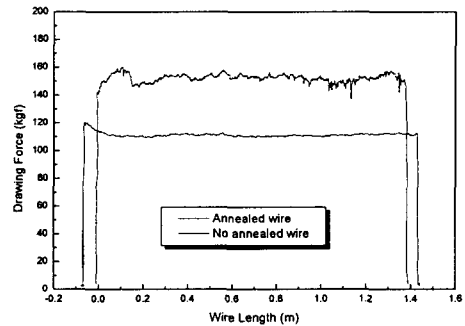


그림 1. 선재인발시 어닐링 유무에 따른 인발력 분포 비교.

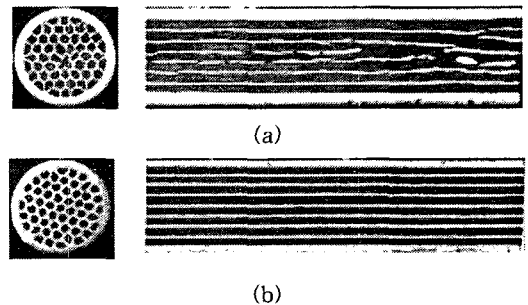


그림 2. 중간 어닐링하지 않은 선재(a)와 중간 어닐링한 선재(b)의 단면 형상.

$$\sigma_{drawing} = \frac{F_{drawing}}{\frac{\pi}{4} (D^2_i - D^2_f) - Fillingfactor} \quad (1)$$

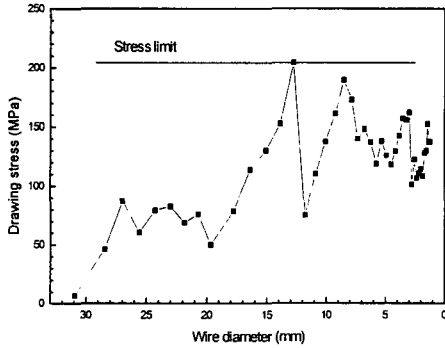


그림 3. 선재 직경별 평균인발응력 변화.

식(1)을 이용하여 인발시 은시스에 부과되는 평균 인발응력을 구했으며 그림 3.에 나타내었다. 최종 직경까지 가공도중 중간어닐링의 회수 및 위치를 정하기 위하여 최대 인발응력을 200 MPa로 제한하였다. 그림 3.에서 알 수 있듯이 직경이 줄어들수록 인발응력은 증가하지만 중간어닐링에 의하여 인발응력의 지속적인 증가가 억제됨을 알 수 있었다.[1] 초전도코아의 밀도 변화를 알아보기 위하여 선재직경별 부피 변화를 그림 4.에서 알아보았다. 초기 650 cm³에서 최종 520 m³까지 줄어들어 약 20 %의 공극제거 및 코아 밀도향상이 있었음을 알 수 있었다.

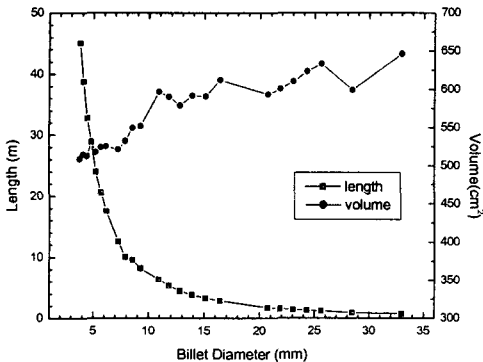


그림 4. 선재 직경별 길이 및 부피 변화.

인발가공이 완료된 선재를 압연가공하였으며 또한 길이방향의 균일가공단면 확보를 위하여 그림 5.와 같이 선재를 가공하기 전후의 장력을 제어하고, 선재의 두께 및 폭을 실시간으로 측정하였다. 권선 장력은 0.5 ~ 1.2 kgf 범위로 일정하게 제어되었으며 결과적으로 두께 및 폭의 오차가 매우 적음을 알 수 있었다. 특히 두께 변화는 내부의 초전도 코아의 배향성 및 임계전류 특성에 밀접한 영향을 미치며 ± 5 μm의 편차는 세계적인 초전도 선재제조사의 결과와 비교하여 매우 우수한 결과이다.[2] 각 압연 공정별 선재단면을 비교하여 그림 6.에 나타내었다. 브릿징이 없는 매우 양호한 단면을 나타내었으며 충진율(Filling factor)은 약 32 %로 타 초전도 선재의 충진율과 비슷하였다.

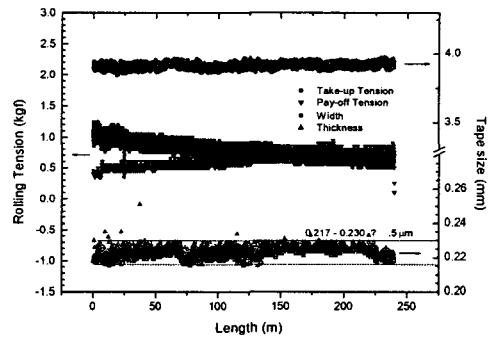


그림 5. 초전도 선재 압연가공 전후의 장력과 압연 후의 두께 및 폭 크기 측정결과.

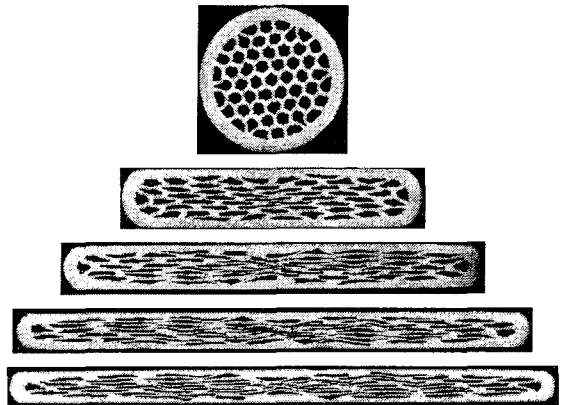


그림 6. 초전도 선재 압연가공물에 따른 선재 단면.

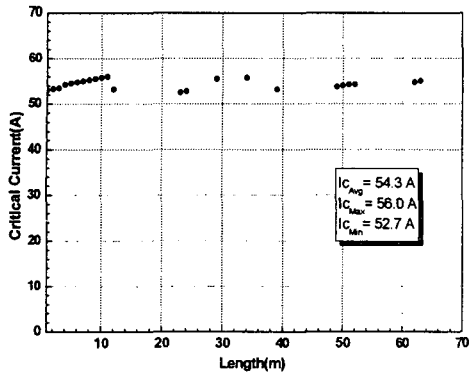


그림 7. 62m 선재의 연속 임계전류 측정 결과.

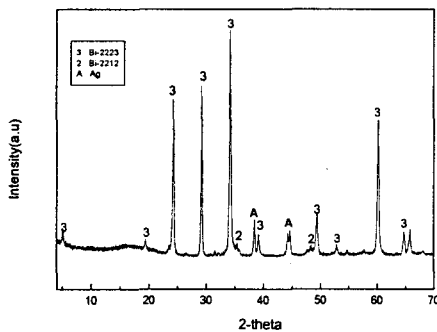


그림 8. Bi-2223/Ag 고온초전도 장선재의 열처리 후 X 선 회절 패턴.

압연 가공된 62 m 장선재는 2차례의 소결열처리를 거쳐 최종 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재로 제조되었으며 특성 평가를 위하여 연속 임계전류 측정 장치를 이용하여 1 m 씩 액체질소온도에서 임계전류를 측정하였다. 그림 7.에 측정결과를 나타내었으며 평균 임계전류 값이 54.3 A였으며 여기에 단면적으로 나눈 값인 공칭임계전류밀도(Je)는 6200 A/cm²이었다. 임계전류 값의 편차가 전체길이에 대해 약 ± 2 A로 매우 우수한 결과를 나타내었다. 이러한 균일한 임계전류 측정치를 나타내는 원인을 알아보기 위하여 XRD분석을 하였으며 그림 8.에서와 같이 Bi-2223상에 잘 발달되어있고 미량의 Bi-2212상이 포함되어 있음을 알 수 있었다. 미량의 Bi-2212가 포함되어도 임계전류 특성에는 큰

영향을 미치므로 향후 미량의 Bi-2212 조차도 제거할 수 있다면 보다 우수한 임계전류 특성을 가진 초전도 선재를 제조할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

길이방향의 균일성을 가진 Bi-2223/Ag 고온초전도 장선재를 제조하기위하여 가공공정을 개선하고자하였으며 아래와 같은 결과를 얻었다.

인발가공도중의 중간어닐링 공정은 초전도 선재 내부의 소세징 및 브릿징 발생을 현격하게 감소시킴으로서 선재길이방향 균일성 확보에 필수적인 공정임을 알 수 있었다.

압연가공전후의 권선장력을 일정하게 유지하므로 인해 높은 두께 및 폭 균일성을 가진 테이프 선재를 제조할 수 있었으며 단면에서 브릿징이 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.

최종 62 m 길이의 장선재를 제조하였으며 평균 임계전류 54.3 A, 공칭전류밀도 6200 A/cm²의 우수한 결과를 나타내었다.

감사의 글

“본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다”

참고 문헌

- [1] M.Malberg, et.al., "Influence of process parameters in drawing of superconducting wire", IEEE Trans. App. Supercon., Vol.9, No.2, p. 2577-2580, 1999.
- [2] R.P. Aloysius, A.Sobha, et. al., "Optimization of tape width and powder packing density in the powder-in-tube processing of (Bi,Pb)-2223 tapes", Physica C, Vol.309, p. 203-207, 1998.
- [3] H.S.Ha, et. al., "The effect of pre-treatment on superconducting property and deformation of Bi-2223/Ag tapes", Proc. of 2003Spr. Sym. KIEEME, 초전도자성체연구회, p.25-29. 2003.