

기지금속을 달리한 Bi-2223 초전도 선에서의 기계적 특성 변화

하동우, 이동훈, 양주생, 김상철*, 황선역, 하홍수, 오상수

한국전기연구원, 넥상스코리아

Mechanical properties at Bi-2223 HTS tapes with various sheath materials

Dong-Woo Ha, Dong-Hoon Lee, Joo-Sang Yang, Sang-Chul Kim*,

Sun-Yuk Hwang Hong-Soo Ha and Sang-Soo Oh

KERI, Nexans Korea

Abstract

Bi-2223 HTS tapes are used widely for application of superconducting power systems. However there are need the properties of high strength and low AC loss. Two kinds of Bi-2223 HTS tapes with different Ag sheath were used to know the effect of sheath alloying for the strength and the resistivity. The workability and reaction degree of superconducting phase at Bi-2223 HTS tapes were investigated. We designed conventional type - Ag/alloy and double sheathed mono filament type - Ag/alloy/alloy in order to increase the strength and resistivity of matrix in Bi-2223 HTS tapes. The effect of axial strain and thermal cycling on the critical current was investigated for the Bi-2223 HTS tapes. Because the workability of double sheath Bi-2223 HTS tape was lower than one sheath Bi-2223 HTS tape, it was need additional softening treatment. Bi-2223 formation reaction was decreased by Ag alloy matrix during sintering process. Two kinds of Bi-2223/Ag tapes with different Ag sheath were used to know the effect of sheath alloying for the tensile strain. Critical current is drastically decreased for Ag/alloy and Ag/alloy/alloy sheathed tapes at tensile strain above 0.24 % and 0.34 %, respectively. This result showed that mechanical strength was increased over than 40 % by introduce double sheath at mono filament stage.

Key Words : Bi-2223 HTS superconductor, Double sheath matrix, Mechanical strength

1. 서론

초전도 전력 시스템의 연구에 있어 고온초전도 선재를 이용하게 되면 냉각 비용을 감소시킬 수 있어 경제성을 향상시킬 수 있다. 고온초전도체를 선재화 할 수 있는 재료에는 여러 가지가 있으나 임계 온도가 높은 Bi-2223 초전도 선을 현재 가장 많이 사용하고 있으며, 특히 고온초전도 케이블을 개발하기 위해서 Bi-2223 초전도 선을 사용한 연구가 활발히 진행되고 있다. Bi-2223 초전도 선의 제조에 있어 일반적으로 단심선을 제조할 때는 초전도체와의 반응을 고려하여 순은 (pire Ag) 튜브를 사용하고 있으며, 이를 다발로 하여 다심선을

제조할 때는 선재의 강도를 향상시키기 위한 목적으로 은합금 튜브를 외피 재료로 사용한다[1]-[3].

Bi-2223 초전도 선을 시스템에 응용하기 위해서는 더 높은 임계전류 값이 요구될 뿐 아니라 교류 또는 펄스 환경에서 사용될 때는 교류손실이 낮은 특성도 절실히 요구되고 있는 실정이다. 그래서 교류손실을 줄이기 위해 압연 공정 전에 원형 선재를 트위스팅하여 선재 내부의 초전도 필라멘트들이 적절한 피치를 가진 상태로 선재를 제조하여 교류손실 값을 줄이는 연구도 수행 중에 있다. 하지만 연선 가공 후 압연에 의한 테이프 형태의 Bi-2223 초전도 선에서는 내부의 필라멘트가 테이프의 양단에서 심하게 꺾이게 됨으로 전류 경로의

손실이 커질 수 있다. 따라서 트위스팅에 의한 임계전류의 저하보다 교류손실 감소분이 상대적으로 더 커져, 만족할만한 결과를 얻기 위해 노력하고 있다[2], [3].

교류손실을 줄이는 다른 방법으로, 독일의 EAS 사에서는 변압기용 도체에서 활용하는 전위도체(transposition conductor) 형태로 연선하여 어느 정도 효과를 얻고 있다[4]. Bi-2223 초전도 선을 전위도체 형태로 만들게 되면 통전전류의 분류와 교류손실 감소의 효과는 있으나 이러한 방법으로는 대전류 통전용 케이블에서만 적용될 수 있으며 한 가닥의 초전도 선에 적용하기는 적합하지 않다.

본 연구에서는 Bi-2223 초전도 선의 기지금속 즉 필라멘트 사이의 모재 금속의 저항을 높여 결합손실에 의한 교류손실을 줄이면서 동시에 기지금속의 강도 향상으로 선에 가해지는 스트레인에 따른 임계전류의 감소 효과도 함께 가질 수 있는 이중 시스템의 단심선을 사용하여 Bi-2223 초전도 선을 제조하고자 하였다. 이중 시스템의 단심선을 적용한 Bi-2223 초전도 선을 제조하면서 가공 조건 및 열처리 조건을 조사하였으며 기계적 특성과 교류손실 특성 향상의 가능성을 조사하였다.

2. 실험

일반적으로 Bi-2223 조성 전구체 분말을 은(Ag) 튜브에 충전한 다음 인발하여 육각필라멘트 형상으로 단심선을 제조하고 있다. 본 연구에서는 은의 강도 및 저항을 증가시킬 수 있는 은 합금을 시스템 재료로 사용하고자 하였다. 그림 1에 이중 시스템 구조의 Bi-2223 초전도 단심선 개념도를 나타내었다. 그림 1의 (a)는 기존 pure Ag 튜브를 사용한 단심선을 나타내었으며, (b)는 시스템 재료로 Ag alloy를 사용한 단심선, (c)는 내부 시스템에 기존의 순은을 외부 시스템에 Ag alloy를 사용한 이중 시스템 구조의 단심선을 나타내었다. 단순히 기계적인 강도 향상을 위하여 시스템 재료로 은 합금을 사용할 수도 있지만 Mg 또는 Mn을 첨가한 은 합금의 경우, 계면에서 합금 원소와 Bi-계 초전도체 간의 반응에 의해 초전도 특성이 감소하는 것으로 알려져 있다. 금을 합금 원소로 한 은 합금의 경우, 이러한 초전도 특성의 저하가 작지만 고가의 재료를 사용하여야 하는 단점이 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 초전도체와 접촉하는 부분은 순은 시

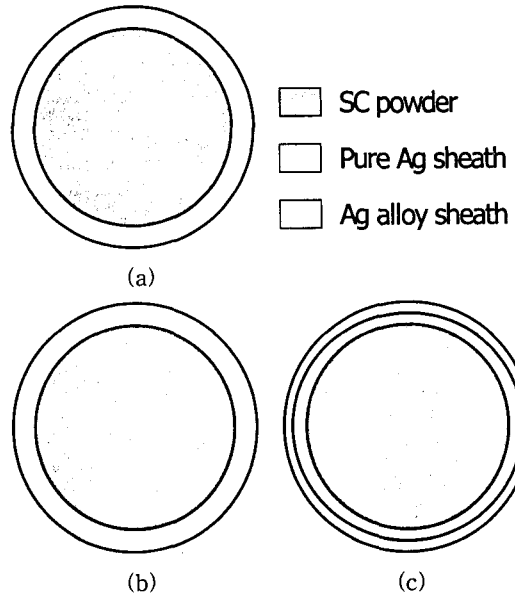


그림 1. Bi-2223 초전도선의 이중시스템 단심선 개념도 (a) 기존 pure Ag 단심선, (b) Ag alloy 단심선, (c) Ag 및 Ag alloy 이중시스템의 단심선.

스 튜브를 사용하고, 그 외부에는 은 합금 시스템을 사용함으로써 초전도 특성의 감소를 줄이면서도 강도의 향상을 가져올 수 있는 이중시스템 구조의 단심선을 제조하고자 하였다.

55%의 다심으로 적층한 선재를 인발 및 신선 공정에 의해 최종 직경까지 가공하였으며 이를 압연에 의해 테이프 형태의 선재로 가공하였다. 압연한 선재는 805 ~ 825 °C의 온도 범위와 8 % O₂ 분위기에서 소결 열처리를 2 회에 걸쳐 수행하였다.

초전도 선재의 임계전류는 77K, 1 μ V/Cm 전압 기준으로 4단자 법으로 측정하였다. 초전도 선에 인장력을 가하기 위해 'U' 자형 지그를 사용하여 변형력을 인가하였으며 이때 임계전류도 함께 측정하였다. 또한 소결 열처리 후 Bi-2223/Ag 고온 초전도 선재의 조성 분석을 위해 XRD를 사용하였다. 또한 단면형상을 조사하기 위하여 광학현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

2. 결과 및 고찰

이중시스템 단심선을 적용하여 다심선으로 제조할 경우 단심선 간의 접합력이 약해져 균일한 가공과

열처리 동안 합금 시스에 의한 초전도 상 생성 반응에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 다심선 가공 공정에 있어 균일한 가공 정도를 확인하는 것이 중요하였다.

그림 2에서는 기존 선재와 이중시스 선재를 가공하면서 균일하게 가공되었는지를 광학현미경을 이용하여 단면을 조사한 것을 보이고 있다. 기존 선재와 비교해 보면 대체적으로 균일하게 가공이 된 것을 알 수 있었다. 즉 각 필라멘트의 크기가 기존 선재보다는 균일하지 못하지만 단선 없이 가공이 진행되었다는 것을 확인할 수가 있었다. 그러나 필라멘트 사이의 매트릭스에서는 단심선의 경계가 나타났다. 즉 기존의 순 은단심선에서는 서로 간에 밀착 결합이 우수하여 경계를 관찰할 수 없었으나 이중시스 단심선에서는 결합력이 떨어져 경계가 나타나고 있었다. 이러한 원인으로 은의 합금 원소가 산화되어 단심선 간 밀착력을 떨어뜨리는 현상과 은 합금 자체의 강도 증가로 연신성이 감소하여 나타난 결과로 여겨졌다.

그림 3은 압연 가공 전 거의 최종 단계까지 신선한 직경 1.5 mm인 도체의 단면과 이를 압연한 도체의 단면을 보이고 있다. (a)에서는 필라멘트의 불균일 가공에 의한 필라멘트의 터짐 현상이 나타나고 있다. 이러한 결과는 기존 도체에 비해 가공성이 나쁘다는 것을 나타내고 있으며 직경이 1.5 mm 이상의 도체 상태에서부터 기존 도체에 비해 가공경화를 해소할 수 있는 방안이 필요하다는 것을 알 수가 있었다. 이를 압연한 도체의 단면인

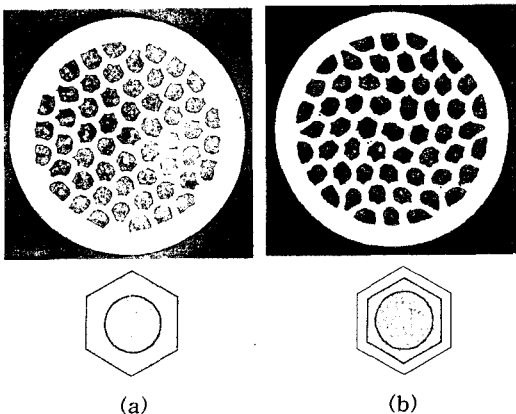
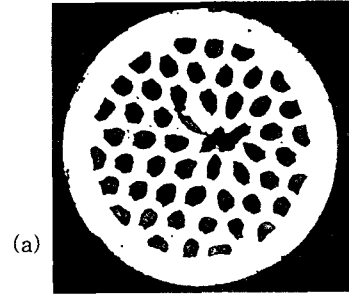
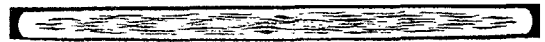


그림 2. 기존 선재와 이중시스 선재의 단면 비교.
(a) 기존 선재, (b) 이중시스 선재



(a)



(b)

그림 3. 압연 가공 전 거의 최종 단계까지 신선한 직경 1.5 mm인 도체의 단면 (a)과 이를 압연한 도체의 단면 (b)

(b)에서는 주로 가운데 부분에서는 압연 가공에 의한 필라멘트 간의 접합 부분이 관찰되었으나 비교적 양호한 상태라는 것이 판단되었다. 하지만 이와 같은 접합부분은 실제 응용 시 결합손실을 증가시키는 요인으로 작용하여 교류손실을 증가시킬 것임으로 신선 공정에서의 가공 조건을 개선할 필요가 있었다.

그림 4는 일차 소결 열처리 후 기존 선재와 이중시스 선재의 XRD 패턴을 나타내었다. 기존 선재 (one sheath)에 비해 이중시스 선재 (double sheath)의 X-ray 피크에서 Bi-2212 상의 분율이 더 높게 나타났으며 그 외의 미반응 상도 더 많이 검출되었다. 이러한 결과는 이중시스의 은 합금 시

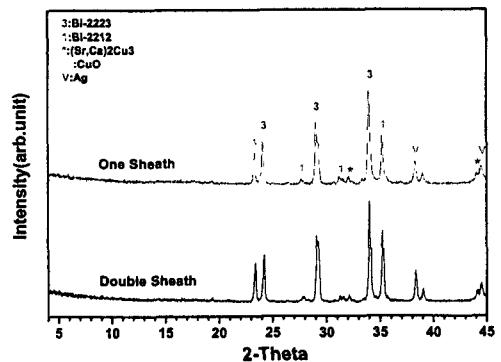


그림 4. 기존 선재와 이중시스 선재의 일차 소결 열처리 후 XRD 패턴 비교.

스가 초전도 필라멘트에서 Bi-2223 초전도 상의 합성을 억제시킨다는 것을 알 수가 있었다. 이러한 이유로는 이중시스에 의한 기지금속의 두께가 기존 선재에 비해 두꺼워져 열처리 과정 동안 혼합 가스의 분위기가 일정하지 않았을 수도 있을 것이며, 은 합금 원소의 산화에 의해 초전도 상의 생성 반응을 방해하는 역할을 한 것으로 판단되었으며 정확한 원인 규명을 위해 추가 실험이 필요하다는 것을 알 수가 있었다.

그림 5는 기존 선재와 이중시스 선재의 인장 변형에 따른 임계전류의 변화를 나타내었다. 변형에 따른 기존 선재에서의 임계전류의 감소는 이중시스 선재에 비해 급격히 나타났다. 임계전류 90%의 값을 비교해 보면 기존 선재에서는 변형률 ϵ 이 0.24%에서, 이중시스 선재에서는 변형률 ϵ 이 0.34% 이상에서 나타나는 것을 알 수가 있었다. 이것은 곧 이중시스를 도입함으로써 약 40% 이상의 기계적인 강도 향상의 결과를 보였다는 것이다. 이처럼 이중 시스에 의한 기지금속의 강도를 높이면 변형에 대하여 필라멘트에 가해지는 응력을 감소시켜 초전도 특성을 더 큰 변형율에서도 유지한다는 것을 알 수가 있었다.

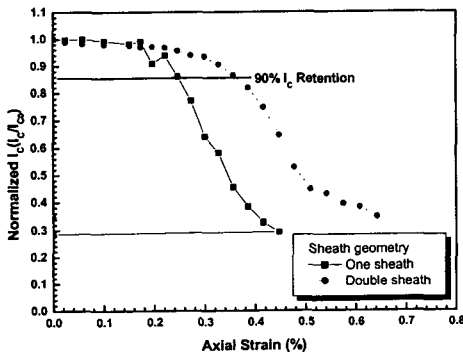


그림 5. 기존 선재와 이중시스 선재의 인장 변형에 따른 임계전류의 변화.

4. 결론

이중시스에 의한 Bi-2223 HTS 초전도 선을 제조하여 인장 변형에 따른 임계전류의 변화를 조사하여 기계적 강도를 40% 이상 향상시킬 수가 있었다.

이중시스의 단심선 간의 접합력은 기존 선재에 비해 약하여 가공성이 떨어졌으므로 가공경화를 해소할 수 있는 방안이 필요하였으며 열처리에서도 은 합금 시스에 의한 초전도 상 생성반응을 억제하는 요인을 제거할 필요가 있었다.

감사의 글

“본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.”

참고 문헌

- [1] L. Masur et al., "Long length manufacturing of high performance BSCCO-2223 tape for the Detroit Edison power cable project" IEEE Trans. on Appl. Supercon., September 17-22, 2000.
- [2] Z. Han et al., "The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag composites", Supercond. Sci. Technol., Vol. 10, p. 371, 1997.
- [3] Private discussion with Sumitomo electric Co. researcher.
- [4] Private discussion with European Advanced Superconductor researcher.