

## Ag 피복 Bi2223 고온초전도 선재의 전기적 · 기계적 특성

장 현만\*, 오 상수, 하 등우, 하 홍수, 류 강식, 김 상현\*  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, 경상대학교 전기공학과\*

### The Electrical · Mechanical Properties of Ag Sheathed Bi2223 High-T<sub>c</sub> Superconducting Wire

H. M. Jang\*, S. S. Oh, D. W. Ha, H. S. Ha, K. S. Ryu, S. H. Kim\*

Korea Electrotechnology Research Institute  
Gyeongsang National University\*

**Abstract** - The various type Ag sheathed Bi-2223 tapes have been were fabricated by Powder-in-tube(PIT) process. The critical current density could be improved with the value of 23,000 A/cm<sup>2</sup>(77 K, zero field) in the single concentric Bi-2223 tape. The bending property dependence of I<sub>c</sub> was improved in the double concentric Bi-2223 tape compared with single filamentary and single concentric one.

의한 선재 단면의 기하학적 구조를 개량하거나 합금 피복재의 사용함으로써 전기적, 기계적 특성을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 PIT법으로 초전도층이 하나인 단심선재를 제조 하였으며, 초전도층을 ring 형태로 배치한 동축형태의 선재를 제조함으로써 은 피복과의 접촉 면적을 크게고 가공과정에서 산화물층의 밀도를 크게 함으로써 열처리시 초전도 결정 성장을 용이하게 하여 J<sub>c</sub>를 향상 시키고자 하였으며, 기계적특성을 개선시키고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 1. 서론

액체질소온도 77K에서도 응용할수 있어 많은 관심을 기울이고 있는 고온 초전도체는 전기에너지분야, 즉 초전도 전력 케이블, 초전도 변압기, HTS 모터 및 한류기로 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1)~3)</sup>. 이러한 실질적인 응용을 가능하게 하기 위한 가장 중요한 요소는 임계전류밀도(J<sub>c</sub>)의 향상이라 할 수 있다.

산화물계 고온초전도선재는 금속계 저온초전도 선재에 비하여 J<sub>c</sub>가 매우 낮으며 산화물 특유의 취성으로 인해 초전도 결정이 부서지기 쉽고, 이로 인해 굽힘이나 외부적 응력 하에서도 아주 큰 J<sub>c</sub>의 저하를 보인다. 또한 금속계 선재에 비해 선재화 과정에서 초전도층의 불균일성이 초래되어 J<sub>c</sub>가 큰 장척선재 제조가 쉽지 않다. 결국 기계적 특성이 우수하고 높은 J<sub>c</sub>를 가지는 장척의 선재제조가 고온초전도 응용의 관건이라 할수 있다.

현재 Powder-In-Tube(PIT)법에 의한 Bi-2223 단심선재 및 다심선재의 J<sub>c</sub> 향상 및 장척화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>4)~5)</sup>. 또한 PIT법에

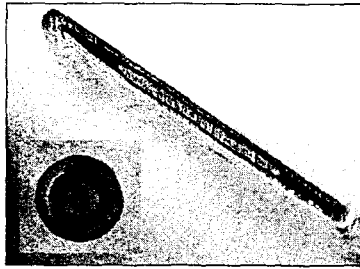
PIT법으로 Bi-2223 단심선재 및 concentric 선재를 제조 하였다. 800 °C 대기중에서 하소된 Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> 분말을 내경 8 mm, 외경 10 mm 은 튜브에 충전하고 직경 1.18 mm ϕ가 될 때까지 인발하여 단심선재를 제조하였으며, 분말이 충전된 은튜브를 4.6 mm ϕ까지 인발하여 다시 내경 8 mm, 외경 10 mm 은 튜브 내부에 동축으로 배치하고 주위에 분말을 채워 1.18 mm ϕ까지 인발하여 초전도층이 두 개인 double concentric 선재로 만들었다. 그리고 직경이 3.6 mm인 은 봉을 내경 8mm 튜브에 동축으로 배치하고 주위에 분말을 채운후 같은 방법으로 single concentric 선재를 제조하였다. 이렇게 제조된 선재는 압연하여 테이프상으로 만들었으며 대기중에서 840°C의 온도로 100 시간동안 열처리 하였다. 압연 및 열처리 과정은 2회 반복하였다. 그림 1.은 제조된 시편의 단면 사진이다.

임계전류(I<sub>c</sub>)는 77 K, 0 T에서 4단자법에 의해 측정하였으며 임계전류는 시편 양단에 1 μV/cm의 전압이 생길때의 전류값으로 정의하였다. 임계전류 밀도는 임계전류치를 시편의 실제 산화물 단면적으로 나누어 계산하였다.

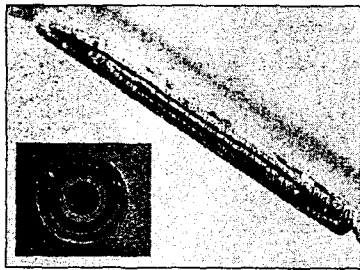
시편의 조직을 관찰하기 위해 전자 현미경(SEM)

및 광학현미경을 사용하였으며, 선재의 종류에 대한 산화물층의 밀도 차이를 조사하기 위하여 경도계로 열처리가 끝난 시편의 산화물층 경도를 조사하였으며, Instron으로 선재의 인장특성을 조사 하였다.

선재의 굽힘율에 대한 내성을 조사하기 위하여 77 K, 0 T에서 굽힘직경을 달리 하면서 임계전류를 측정하였다. 테이프의 굽힘율( $\epsilon$ )은  $\epsilon = t/D$ 로 계산 되며<sup>7)</sup>, 여기서  $t$ 는 테이프의 두께이고  $D$ 는 굽힘직경을 말한다.



a) Single Concentric



b) Double Concentric

Fig. 1 Photography of concentric Bi-2223 wires and tapes

### 3. 결과 및 고찰

그림 2는 최종 열처리가 끝난 선재의 두께변화에 따른 산화물층 Vickers hardness(경도)를 측정한 결과이다. 이 결과로써 대체적으로 두께가 얇아질수록 산화물이 더욱 치밀하게 가공되어 산화물층의 밀도가 높아지며, 단심 선재 보다는 concentric 선재의 산화물층 밀도가 높다는 것을 알 수 있다. Double concentric 선재에서 외부 초전도층의 경도가 내부 보다 1~ 5 kg/mm<sup>2</sup> 정도 높는데, 이는 압연롤러가 외부에서 압력을 가함으로 선재의 중심부 위로 갈수록 압력이 줄어들고, ring 형태로 배치된 Ag 부분이 압연시 큰 역할을 하지 못하기 때문이다. 이에 반해 Ag rod가 동축으로 배열된 single concentric 선재는 은 피복재와 중심축의 은봉에 의해서 압연시 압력이 그대로 산화물에 전달되기 때문에 두께가 감소할수록 경도가 급격히 증가하여 0.15 mm 두께에서는 double concentric 선재보다 약 10 kg/mm<sup>2</sup>정도 크게 나타난다. 이러한 산화물의 경도변화는 1차 열처리가 끝난 테이프의 2차 압

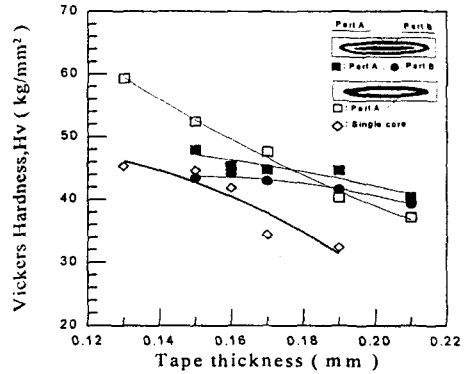


Fig. 2 The relation between the Vickers hardness of oxide layer and the tape thickness

연과정에 의해 크게 영향을 받는다. 1차 열처리 후 은의 경도가 낮아져 압화율이 비교적 적은 두꺼운 선재에서는 은 부분이 크게 산화물의 밀도에 영향을 주지 못하므로 double concentric 선재의 경도가 single concentric 선재보다 더 크며 압화율이 커지면 은이 경도를 회복해 전과 반대의 현상이 나타난다고 사료된다.

그림. 3은 77 K, 0 T에서 선재 두께에 대한 임계전류밀도의 관계를 나타낸 것이다. 세가지의 선재 모두 두께가 감소할수록 산화물층의 밀도가 높아져  $J_c$ 가 증가함을 알 수 있다. 그러나 단심 선재와 single concentric 선재는 두께가 0.15 mm이하에서 줄어드는 경향을 나타낸다. 이것은 선재의 두께가 얇아짐으로써 초래되는 산화물층의 불균일성 때문이라 할 수 있다<sup>8)</sup>. 두께 0.15 mm double concentric 선재의  $J_c$ 는 14 kA/cm<sup>2</sup>로 단심선재의 15 kA/cm<sup>2</sup>보다 낮은 값을 나타낸다. 같은 두께 single concentric 선재의  $J_c$ 는 약 23 kA/cm<sup>2</sup>로 다소 향상된 값을 나타내는데, 이는 산화물층의 밀도가 높고 Ag 피복과 접촉면적이 증가하여 열처리시 초전도 결정성장이 용이하기 때문에  $J_c$ 가 향상된 것으로 사료된다.

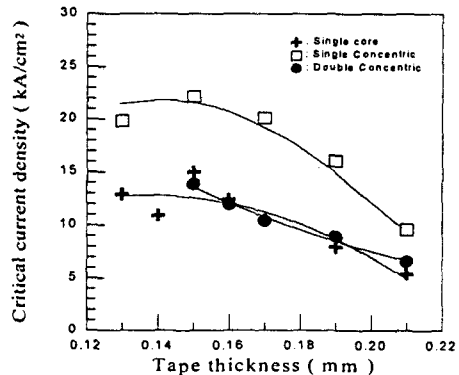


Fig. 3 Thickness dependence of  $J_c$  for the samples

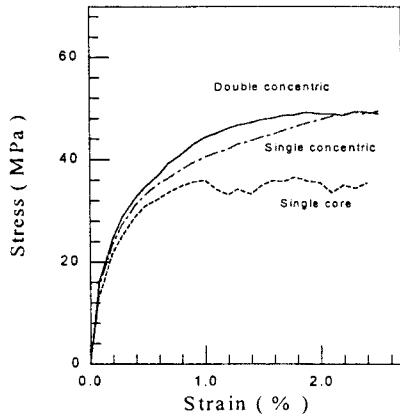


Fig. 4 Stress-strain curve of the three samples

그림 4는 응력 변형률 곡선으로, 0.17 mm 두께를 가지는 3종류 선재의 인장특성을 나타낸 것이다. 보았다. 단면적당 Ag의 비율이 높은 concentric 선재는 인장강도가 약 50 MPa를 나타내며, 단심선재의 경우 약 35 MPa로써 다소 낮은 값을 나타낸다. 산화물비가 큰 단심선재의 경우 큰 탄성강도를 가져야 하지만 가공시 낮은 밀도의 증가로 인하여 concentric 선재보

다 낮은 탄성강도를 가짐을 알수 있었다. 이로써 선재에 장력이 가해졌을 때 단심선재 보다는 concentric 선재의  $J_c$  특성이 우수할것으로 보인다.

그림. 5는 최종 열처리가 끝난 선재의 굽힘율에 대한 임계전류의 저하 특성을 조사하여 나타낸 것이다. 선재를 굽힐 경우 굽힘직경의 내(內)측 부분은 압축응력이 가해지며 외(外)측 부분은 인장응력이 가해지기 때문에 외(外)측 부분이 선재에 더 큰 영향을 끼친다. 이 결과 단심선재는 약간의 변형굽힘을 하에서도 소결된 초전도체에 미세한 균열이 생겨 급격한 임계전류의 감소를 나타내지만, 이에 반해 single, double concentric 선재가 변형굽힘을 하에서 임계전류의 감소가 적었다. Concentric 선재는 0.4% 이하의 변형굽힘을 하에서는 굽힘율이 없는 초기 임계전류밀도의 50% 이상을 유지하고 있다. 이는 그림 4에 나타난 것처럼 단면적당 Ag의 비율이 클수록 기계적 변형굽힘율에 대한 내성이 강해지기 때문이다. 즉 Ag와의 계면이 많을수록 변형굽힘에 의한 응력을 Ag 부분이 완충역할을 함으로써 임계전류 저하를 막아준다 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 PIT법으로 초전도층을 ring 및 rod 형태로 동축으로 배치하여 Bi-2223 초전도 테이프를 제조 하였다.

산화물층의 밀도를 조사하기 위해 경도를 측정 한 결과 double concentric 선재의 외부 초전도층이 내부 초전도층 보다 크며 두께의 감소

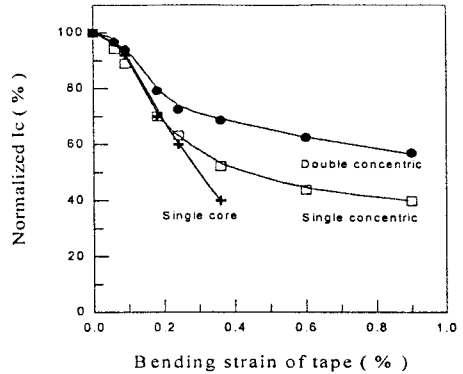


Fig. 5 Bending strain tolerance of the various sample

에 대해 완만한 증가를 보였다. 반면 single concentric 선재의 산화물층 경도는 두께의 감소에 대해 급격한 증가를 보였다. 이것은 두께가 얇을수록 산화물층의 밀도가 커져  $J_c$ 가 증가하는 원인이라 할 수 있다. 초전도층이 두 개인 double concentric 선재의  $J_c$ 는  $14 \text{ kA/cm}^2$ 이며, 단심선재는  $15 \text{ kA/cm}^2$ , single concentric 선재는  $23 \text{ kA/cm}^2$ 로써 다소 향상된 값을 나타낸다.

테이프의 인장특성과 굽힘 변형에 대한 임계전류의 특성을 조사한결과 단면적당 Ag의 비율이 큰 concentric 선재가 단심선재 보다 나은 특성을 나타내었다.

#### [ 참고문헌 ]

- 1) M.Hiraoka, K.Sawada, A.Okuhara and J.Kai : Proc. of US-JAPAN Workshop on High  $T_c$  Superconduct, Nov., 1992 Japan p,17
- 2) D.W.Von Dollen and T.R. Schneider : Proc. of US-JAPAN Workshop on High  $T_c$  Superconduct, Nov., 1992 Japan p,54
- 3) M.satou, Y.Yamada, S.Murase, T.Kitamura and Y.Kamisada : Appl.Phys.Lett. 10(1994)640
- 4) S.X.Dou, K.H.Song, H.K.Liu, C.C. Sorell, M.H.Apperley and N.Savvides : Appl. Phys. Lett., 56(1990)493
- 5) K.Sato, T.Hikata, H.Mukai, M.Ueyama, N.Shibuta, T.Kato, T.Matstude, M.Magata, K.Iwata and T.Mitsui : IEEE Trans Mag. MAG27(1991),1231
- 6) S. Zannella, L. Martini, L. Bigoni, E. Marelli, V. Ottoboni. Fourth EURO Cermics Vol. 7 p. 161 1995.
- 7) S.Yuhya, K. Hosotani and M. Hiraoka, Advances in Superconductivity VI ( Tokyo : Spring-Verlag, 1994), p. 659.
- 8) K.Osamura, S.S.Oh, and S.Ochiai : Supercond SciTechnol., 5(1992)1