

Bi-2223/Ag 고온초전도 장선재의 제조

김상철, 이동훈*, 하동우*, 오상수*

넥상스코리아(주) 기술연구소, 한국전기연구원 초전도재료연구그룹*

Fabrication of long length Bi-2223/Ag HTS tape

Sang-Cheol Kim, Dong-Hoon Lee*, Dong-Woo Ha*, Sang-Soo Oh*

Nexans Korea Ltd., Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract

In order to use HTS tape on electric power applications, such as cable, motor, transformer, fault current limiter, a long length of HTS tape with a good uniformity of critical current is inevitable. The longer length of HTS tape, the wider in the range of application and the lower cost of HTS tape. In this study three long length Bi-2223/Ag tapes(268m, 253m and 187m) were fabricated. Critical current uniformity along the length was greatly improved through the optimization of cold deformation and thermo-mechanical process. Average critical current of the tapes was 63.2 A, 54.6 A and 64.2 A, respectively. Critical tensile strength and critical bending radius (77 K, 5 % I_c degradation) was 135 MPa and 56 mm, respectively.

Key Words : Bi-2223/Ag tape, critical current, long length

1. 서 론

현재 상용화된 Bi-2223/Ag 테이프는 주로 PIT (Powder-In-Tube)법으로 제조되며 미국, 일본, 유럽, 중국 등 전세계에서 생산되어 케이블, 모터, 변압기 등에 적용되고 있다[1-4]. 임계전류를 높여서 성능대비 가격을 낮추기 위한 연구가 계속 진행되고 있으며 coated conductor선재도 병행하여 진행되고 있지만 특성, 가격 그리고 길이면에서 상용화를 위해서는 더욱 오랜 시일이 소요될 전망이다.

Bi-2223 박막에서는 임계전류밀도(J_c)가 ~ 1600 kA/cm² (77 K, 0 T)인 반면에 테이프에서는 ~ 80 kA/cm²가 최고값인데 이것은 이론적으로 가능한 값의 단지 5 %만을 달성한 것으로 아직도 임계전류밀도를 향상시킬 수 있는 여지가 충분하다는 것을 보여주고 있다[5].

대부분의 초전도선재의 응용기기들은 수백 m이상의 길이를 요구하고 있으며 그 길이를 길게 할

수록 응용의 폭이 넓어질 수 있기 때문에 초전도 선재의 장선화는 상용화를 위해 반드시 필요한 기술이다. 본 논문에서는 넥상스코리아(주)의 약 200 m급 선재에서의 임계전류의 재현성, 균일성 그리고 기계적 특성 등 상용화를 위해 필요한 요구조건을 보고하고자 한다.

2. 실험

Merck사에서 구입한 Bi_{1.78}Pb_{0.325}Sr_{1.85}Ca_{1.98}Cu_{3.06}Ox 조성의 분말을 clean room에서 분말충진장치를 이용하여 3개의 1 m급 Ag tube에 충전하였다. 각 단심빌렛을 인발공정으로 직경을 감소시키고 pre-annealing을 실시하고 육각 선재로 인발 후 3개의 Ag-Mn tube에 각각 55 개의 단심선재를 적층하여 다심빌렛을 제조한 후 1.2 ~ 1.3 mm dia. 까지 인발하였다. 최종 인발된 선재는 압연율을 달리하여 3 회의 압연을 실시하여 최종 압연된 테이프를 제조하였다. 1차 열처리하는 공기중에서 실시되었고 중간압연율을 10 ~ 25 %로 하여 중간압연

을 실시한 후 8 % O₂ 분위기에서 2차 열처리와 post-annealing을 실시하여 장선재를 제조하였다.

초전도 선재의 입계전류는 연속 I_c 측정장치를 이용하여 77 K, 1 μV/cm를 기준으로 1 m간격으로 4 단자법으로 측정하였다. 상분석은 XRD를 이용하여 테이프의 한쪽 면의 Ag부분을 벗겨낸 후 실시되었다.

3. 결과 및 고찰

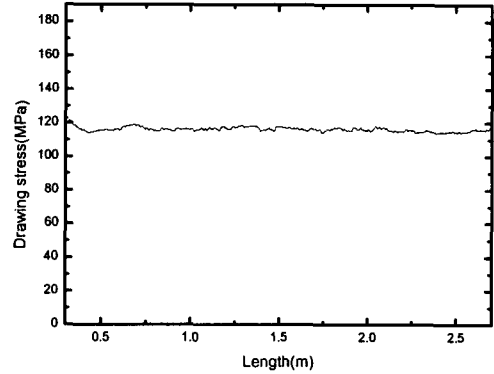
그림 1은 A선재의 (a)단심 16.4 mm dia.와 (b)다심 6.17 mm dia. 선재를 인발할 때 인발장력의 변화를 보여주고 있다. 단심인발장력은 분말 충전 후 밀도가 약 23 %로서 선재인발시 주로 은이 인발력의 대부분을 받기 때문에 은의 단면적으로 인발력을 나누어 구하였다. (a)에서는 114 ~ 123 MPa의 범위를 가지고 (b)에서는 126 ~ 179 MPa의 범위를 가지는데 다심 인발시 단심인발보다 응력분포의 불균일성이 높아져 단심 인발보다 표준편차는 커지만 급격한 인발장력의 변화는 발견되지 않는 것으로 보아 비교적 균일하게 인발된다고 판단된다.

그림 2는 A선재의 장선압연시 길이에 따른 두께와 폭변화를 나타내고 있는데 두께는 대부분 0.199 ~ 0.222 mm의 범위에 있고 약 ±12 μm의 두께 균일도를 가지고 폭은 대부분 3.9 ~ 4.1 mm의 범위에 있고 약 ±100 μm의 폭균일도를 가진다. pay-off와 take-up의 장력은 0.5 ~ 1.5 kgf가 되도록 조절하여 균일한 압연이 되도록 하였다.

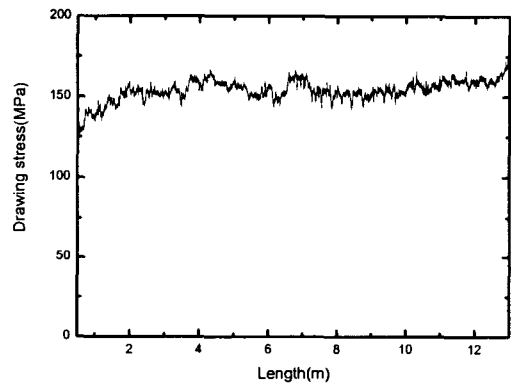
장선재를 열처리시 가스가 선재의 표면에 잘 반응할 수 있도록 선재간의 간격을 넓혔고 테이프끼리 열접합되는 현상을 방지하기 위해 지르코니아가 코팅된 은 테이프를 co-winding하고 대형로의 윗부분에 fan을 장착하여 가스의 흐름이 원활해지도록 했는데 그림 3은 이렇게 장선재가 금속판위에 권선된 사진을 보여주고 있다.

최종 열처리 후 각 선재의 종단면과 횡단면을 관찰한 것을 그림 4에서 보여주고 있는데 각 선재의 필라멘트가 비슷한 모양을 하고 있고 소세징 현상이 거의 없이 균일하게 가공되었다고 판단된다. 단심육각 선재, 최종 인발선재 그리고 최종 열처리 후 테이프의 충전율을 조사하였을 때 약 4 %이내의 거의 비슷한 값을 나타내었다. 폭과 두께의 비인 aspect ratio도 각 선재의 필라멘트와 테

이프에서 비슷한 값을 나타내었는데 이러한 단면 분석을 통하여 3 개의 장선재가 재현성 있게 제조되었다고 판단된다.



(a) A선재의 단심인발시 인발장력의 변화



(b) A선재의 다심인발시 인발장력의 변화

그림 1. A선재의 단심 및 다심 인발 장력. 다심 보다는 단심인발시 인발장력이 균일하다.

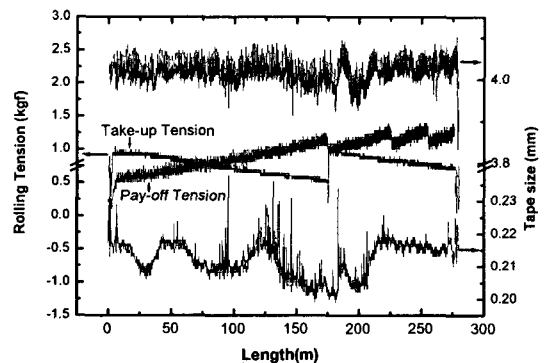


그림 2. A선재의 1차 최종압연시 두께, 폭 그리고 take-up, pay-off의 장력변화.

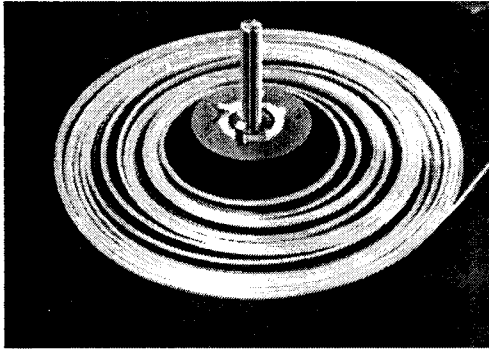


그림 3. 장선재 열처리 권선사진.

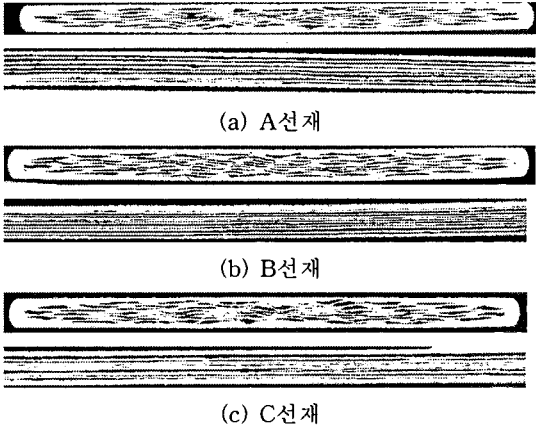


그림 4. 최종 열처리 후 각 선재의 종단면과 횡단면 사진.

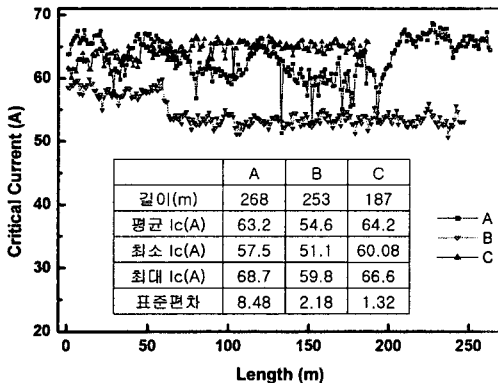


그림 5. 각 장선재의 길이에 따른 임계전류 특성. A선재에서 C선재로 갈수록 임계전류의 표준편차가 줄어든다.

그림 5는 A, B, C 각 장선재의 길이에 따른 임계전류를 보여주고 있는데 187 m ~ 268m의 길이에서 51.1 A ~ 68.7 A의 값을 가지며 처음 제조한 A선재보다 나중에 제조한 B, C선재의 임계전류의 표준편차가 줄어든 것을 알 수 있는데 이것으로 장선재의 균일성이 향상되었다고 판단된다. 장선재의 TMT(Thermo-Mechanical Treatment)를 실시하기 이전에 단척 시편으로 선행실험을 실시하였는데 장선재의 임계전류와 비교하였을 때 약간 높은 값을 가지지만 장선재의 특성이 단선재의 특성에 많이 근접함을 알 수 있었다.

그림 6은 최종열처리 후 각 선재의 X선 회절 패턴을 나타내고 있는데 2223, 2212, Ca_2PbO_4 의 peak가 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

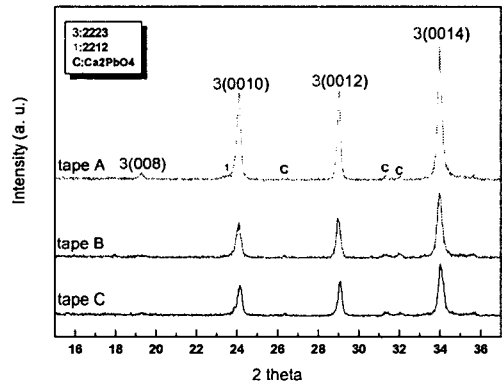


그림 6. 최종 열처리 후 각 선재의 X선 회절 패턴.

표 1. A선재의 기계적 특성.

기계적 특성	측정 조건	측정 값
인장강도	상온	130 Mpa
	77 K	135 Mpa
항복강도	상온	120 Mpa
	77 K	128 Mpa
영률		34 GPa
최소굽힘 직경	5 % Ic degradation	56 mm
	10 % Ic degradation	48 mm
임계굽힘 변형률값	5 % Ic degradation	0.37 %
	10 % Ic degradation	0.434 %

표 1은 A선재의 기계적 특성을 나타낸 것인데 130 MPa 이상의 임계인장강도를 가지고 56 mm 이하의 임계굽힘직경을 가짐을 알 수 있다. 이것은 bare tape에서 외국선재회사의 특성과 비슷하다고 판단된다.

4. 결론

약 200 m급의 Bi-2223/Ag tape을 3개 제조하여 재현성과 선재의 길이에 따른 특성의 균일성을 평가하였다. 인발공정에서는 길이에 대한 인발장력을 평가하고 압연공정에서는 tape의 두께와 폭, 장력 등을 측정함으로써 실시간으로 선재의 가공이상유무를 판단할 수 있었고 테이프의 단면분석으로 층진율, aspect ratio를 분석비교하고 pre-annealing, post-annealing, 열처리 방법의 개선 등으로 최종 tape의 임계전류 균일성을 높일 수 있었다.

선재의 기계적 특성평가를 실시한 결과 임계인장강도 130 MPa과 임계굽힘직경 56 mm의 비교적 양호한 값을 나타내었다.

Bi-2223/Ag 장선재를 제조하고 재현성을 확인함으로써 상용화에 더욱 근접한 선재를 제조할 수 있는 길을 열었다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Malozemoff et. al "HTS Wire at Commercial Performance Levels", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, Vol. 9, No. 2, p. 2469-2473, 1999.
- [2] T. Kaneko, M. Ueyama, A. Mikumo, N. Ayai, S. Kobayashi, K. Hayashi, H. Takei, O. Kasuu "Development of Ag-sheathed wires based on Bi compounds", Physica C 335, p. 20-25, 2000.
- [3] Per Vase, Rene Flukiger, Martino Leghissa,

Bartek Glowacki "Current status of high-Tc wire", Supercond. Sci. Technol. 13, p. 71, 2000.

- [4] H. P. Yi, Z. Han, J. S. Zhang, T. Liu, L. Liu, M. Y. Li, J. Fang, Q. Liu, Y. K. Zheng "Research status of the manufacturing technology and application properties of Bi-223/Ag tapes at Innost", Physica C, 2004. in press
- [5] Lotte Gottschalck Andersen "Structural Properties of Superconducting Bi-2223/Ag Tape", Ph. D thesis, p. 8, 2001.