

Bi-2223/Ag 고온초전도선재의 가공균일성에 미치는 인발공정연구 I

Bi-2223/Ag HTS Drawing Process Study for Uniform Deformation I

김상철, 하홍수*, 오상수*, 이동훈*, 양주생*, 하동우*, 권영길*, 한일용, 이종건
S.C Kim, H.S Ha, S.S Oh, D.H Lee, J.S Yang, D.W Ha, Y.K Kwon, L.Y Han, J.G Lee

Nexans Korea Ltd.

Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract

PIT method which is used at fabricating Bi-2223/Ag HTS wire includes a drawing process, conventional deformation method. Drawing of metal(Ag) and ceramic(BiSrCaCuO) composite is also difficult and significant for uniform deformation. In this paper, parameters of uniform deformation was studied at Bi-2223/Ag multifilamentary HTS wire. Powder and rod as a starting precursor was compared at 55 filament and 54 filament Bi-2223/Ag HTS wire, respectively. Micro-hardness and area COV of the filaments was also evaluated when the diameters were decreased through drawing operations.

Key Words : Bi-2223, PIT, drawing

1. 서 론

Bi-2223 고온초전도체는 주로 PIT공정을 이용하여 선재화되며 상용화에 가장 근접한 초전도체이다 [1]. 단심선재에 비해서 다심선재는 기계적 특성이 좋기 때문에 초전도 응용기기에는 주로 다심선재가 이용되고 있다. PIT법으로 제조되는 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재는 전통적인 가공법인 인발과 압연 등의 소성가공을 이용하여 제조되며 인발공정은 단심 선재를 목표로 하는 직경까지 인발한 후 인발된 단심선재를 은튜브내에 다시 충전하여 인발하는 것으로 압연직전까지의 공정이다. 금속인 은과 세라믹인 전구체분말로 된 복합재료인 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재를 인발가공 할 때 필라멘트의 소세징, 단선 등을 억제하고 가공균일성을 향상시키는 것이 가장 중요하다 [2].

M. Malberg은 단심선재에서 최적의 단면감소율과 approach각(α) 등 최적의 인발가공조건을 찾았다 [3]. 본 연구에서는 단면감소율과 approach각(α)은 고정하고 출발 전구체로 rod를 사용할 경우와 분말을 사용할 경우, 그리고 필라멘트의 수를 달리했을 때 최적의 인발가공조건을 찾았다.

2. 실험

전구체분말과 rod의 조성은 각각 $\text{Bi}_{1.72}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{1.96}\text{Cu}_{2.99}\text{O}_x$ 와 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.33}\text{Sr}_{1.87}\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 이고 평균 입자크기는 $2.11\mu\text{m}$ 와 $1.5\mu\text{m}$ 였다. 표 1은 사용한 출발 전구체, 필라멘트의 수 그리고 단심선재의 어닐링 횟수를 나타내었다. B선재의 경우 인발시 발생할 수 있는 central burst 현상을 억제하기 위하여 선재 중심의 필라멘트를 은rod로 대체하였다 [4].

넥상스코리아 기술연구소
(충북 청원군 남이면 사동리 165번지)
Fax: 043-270-0379
E-mail : sckim@nexanskorea.com

표 1. 선재의 종류

Table 1. Classification of Wires

출발 선구체의 종류	필라멘트의 수	단심선재 어닐링 횟수
A rod	55심	2
B rod	54심	2
C powder	55심	1

불활성분위기에서 은튜브에 rod를 삽입하거나 분말을 충전하였고 A, B선재는 rod를 삽입 후 CIP(Cold Isostatic Press)를 실시하였다. A, B선재는 rod의 밀도가 이론밀도(6.6 g/cm³)의 59%였고 C선재의 경우 분말충진 후 밀도는 27 %였다. 다심선재로 충전한 후에는 모든 선재에 대해 CIP를 실시하였다.

다심선재에서 A, B, C선재의 종단면과 횡단면을 분석하고 직경변화에 따른 fill factor, 경도, 그리고 위치별 필라멘트면적 COV (Coefficient of Variation)를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 직경 1.18mm까지 최종 인발 후의 A, B, C선재의 종단면과 layer의 정의를 나타내고 있다. A선재는 최종 인발 후에 1st layer와 중앙의 필라멘트가 브릿징이 일어났고 B선재에서는 1st layer와 2nd layer의 3개의 필라멘트가 브릿징되었지만 C선재에서는 전혀 브릿징이 발생하지 않고 균일한 가공이 되었다. 선재의 종단면이 선재의 길이 방향으로 동일한지 조사하기 위해 10cm씩 3개의 선재의 종단면을 분석한 결과 비슷한 양상을 보였다. 금속으로 되어있는 복합재에서 필라멘트 브릿징은 선재의 기하학적 배치, 재료의 강도차이, 단면감소율, approach각 등을 최적화 함으로써 억제 할 수 있다고 보고되고 있는 데 이러한 인자들은 금속과 세라믹으로 이루어진 고온초전도 복합재에서도 적용될 수 있을 것으로 사료된다 [4].

그림 2는 직경이 감소함에 따라 A와 C선재의 fill factor를 비교하였다. 다심 적층을 하기전 육각 필라멘트 일 때의 fill factor는 각각 0.64, 0.49로 분말을 충전한 C선재에서 fill factor가 낮게 나타났다. 직경 5.77mm에서 3mm까지는 fill factor 변화가 거의 없었지만 그 이하의 직경에서는 증가하였

고 직경 2mm이하의 fill factor의 변화는 측정 오차범위에 포함되는 것으로 사료된다.

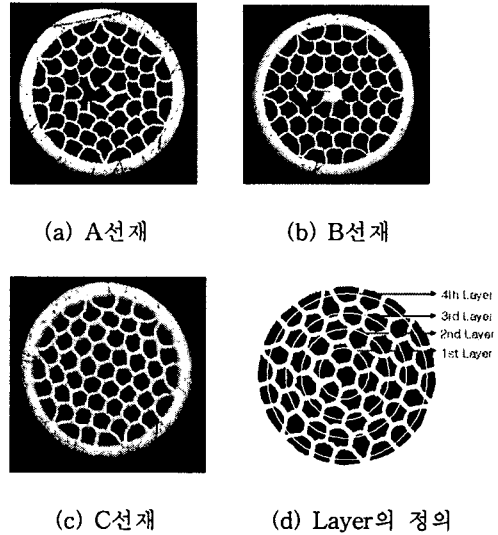


그림 1. 최종인발 후의 A, B, C선재의 종단면과 Layer의 정의

Fig. 1. Transverse cross-section of A, B, and C wire after final drawing and definition of layers

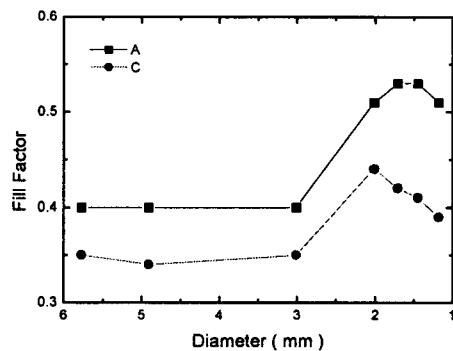


그림 2. 직경변화에 따른 A, C 선재의 Fill Factor
Fig. 2. Fill Factor of A, and C wires as a function of diameter

그림 3은 A, B, C선재에서 직경이 감소함에 따라 전체 필라멘트면적의 COV 변화를 나타내었다.

COV는 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 COV가 클수록 필라멘트면적의 차가 큼을 알 수 있다.

B와 C선재에서는 직경이 감소함에 따라 COV의 변화가 거의 없었지만 A선재에서는 직경이 감소함에 따라 COV가 증가하였다. 출발전구체를 rod를 사용한 A, B선재에서 중심에 은wire를 삽입한 B선재가 필라멘트의 가공균일성이 우수한 것으로 관찰되며 필라멘트의 기하학적 배치구조가 가공성에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다.

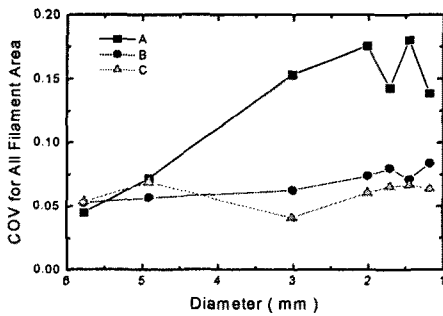


그림 3. 직경변화에 따른 A, B, C 선재의 전체필라멘트면적의 COV

Fig. 3. COV for all filaments area of A, and C wires as a function of diameter

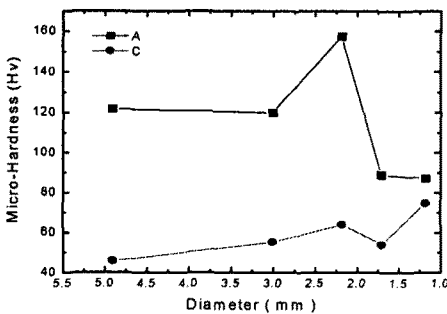
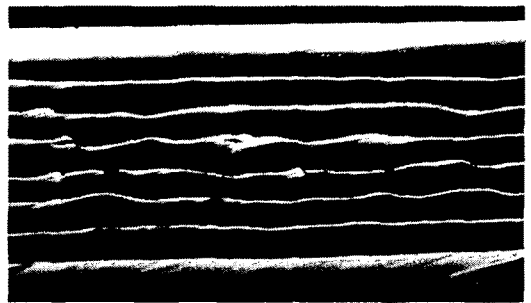


그림 4. 직경변화에 따른 A, C 선재의 경도

Fig. 4. Micro-hardness of A, and C wires as a function of diameter

그림 4는 fill factor가 다른 A, C선재에서 직경이 감소함에 따라 평균경도의 변화를 나타내고 있다. 경도는 1st layer에서의 평균값으로 구하였고

필라멘트의 위치에 따른 오차를 줄이기 위해 필라멘트중심부의 경도를 측정하였다. 두 선재의 초기 경도는 크게 차이가 났으나 최종 인발직경에서는 그 차이가 현저하게 줄어든 것을 확인하였다. A선재는 출발전구체를 rod로 사용하였기 때문에 C선재에 비해 전체적으로 경도가 높음을 알 수 있다. 반면 분말을 출발전구체로 사용한 C선재는 직경이 감소함에 따라 경도가 증가하는데 이것은 분말충진 후 밀도가 낮았기 때문에 다심적층 후에도 계속 밀도가 증가하는 것으로 판단된다.



(a) A선재



(b) B선재



(c) C선재

그림 5. A, B, C 선재의 횡단면

Fig. 5. Longitudinal cross-section of A, B, and C wires

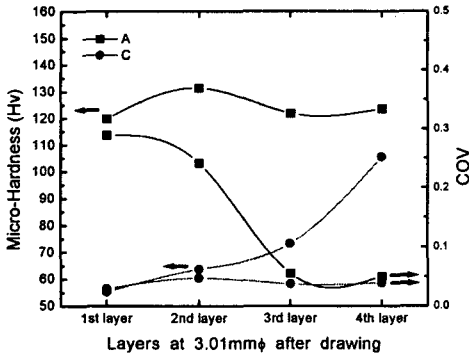


그림 6. 직경 3.01까지 인발 후 A, C 선재의 각 layer별 경도와 필라멘트면적 COV

Fig. 6. Micro-Hardness and filaments area COV of A and C wires as a function of layers at a diameter of 3.01mm after drawing.

그림 5는 직경 1.18mm에서 A, B, C 선재의 횡단면을 나타내었다. B와 C선재는 균일한 횡단면을 나타내고 있지만 A선재는 다수의 미세징 현상과 필라멘트 브릿징 현상이 관찰되었다. 다심선재 인발가공시에도 A선재가 가장 단선이 많았는데 그것은 은과 세라믹의 강도차이, 높은 fill factor 그리고 필라멘트면적 COV의 증가가 원인인 것으로 판단된다. 반면 선재중심에 은wire를 삽입한 54심으로 제조된 B선재의 경우 fill factor를 많이 낮추지 않고 비교적 균일한 가공을 할 수 있었다.

그림 6은 직경 3mm의 A와 C선재에서 layer별 경도분포와 COV 분포를 나타내었다. A선재에서는 선재의 원주방향으로 갈수록 COV는 작아지고 경도는 layer별로 변화가 적은 것으로 관찰되었다. 반면 C선재에서는 필라멘트의 COV는 거의 변화가 없지만 선재의 원주방향으로 갈수록 경도가 증가하였는데 이것은 은과 세라믹의 강도차이 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

Bi-2223/Ag 선재를 55심과 54심으로 제조했을 때, rod와 분말을 사용했을 때 선재의 종, 횡단면과 필라멘트면적 COV를 분석한 결과 다음과 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 같은 필라멘트의 기하학적 배치구조에서 분말로 제조한 선재가 rod로 제조한 선재보다 가공 균일성이 나은 것으로 판단된다.

(2) Rod로 제조한 선재에서 중심부에 은wire를 삽입한 필라멘트의 기하학적 배치구조가 가공균일성을 향상시켰다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] A. P. Malozemoff et al. , “HTS wire at commercial performance levels”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, p. 2469, 1999
- [2] Z. Han, P. Skov-Hansen and T Freltoft, “The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag composites” , Supercond. Sci. Technol., Vol. 10, p. 371, 1997
- [3] M. Malberg, J. Bech, N. Bay, P. Skov-Hansen, G. Cualbu, “Influence of process parameters in drawing of superconducting wire” , IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, p. 2577, 1999
- [4] <http://www.metalforming-inc.com>