

## 유한요소법에 의한 Bi2223 고온 초전도 선재의 다심 인발에 대한 연구

박동인\* · 김병민\*\* · 오상수\*\*\*

(2003년 10월 9일 접수)

### A Study on Multi-Filament Drawing of Bi2223 High-Temperature Superconductivity Wire by FE Method

D. I. Park, B. M. Kim and S. S. Oh

#### Abstract

High-temperature superconduction materials(Bi2223) possess electrical/electronic and magnetic properties. Because high-temperature superconduction materials is a ceramic powder, that cannot be produced singlehandedly. So Ag sheathed Bi-2223 wire was produced by drawing process using powder-in-tube(PIT) method. This superconductor has many difficulties to produce. The main difficulty is that the mechanical properties of the ceramic powder are very different from those of the Ag sheath. And by these properties, Bi2223 high-temperature superconductor, which has a single filament drawing process and multi-filament drawing process, has a defect like sausaging and bursting at a center. This study analyzed multi-filament drawing process by FEM, and a defect generated during multi-filament drawing was studied by FEM. Specially, in order to prevent a bursting at a center, this study presented a method that inserts a pure Ag at a center of multi-filament wire

**Key Words** : Bi2223 High-Temperature Superconductivity, Multi-Filament Drawing, FEM, Drawing Process, PIT Method, Drawing Defect, Damage Value

#### 1. 서론

완전 도전성 및 완전 반자성의 성질을 갖는 초전도 물질이 발견된 이래, 초전도에 대한 많은 연구가 있었다. 초기에 금속계 초전도체에 대한 연구를 바탕으로 1980년대 세라믹계 초전도 물질이 발견됨으로써 초전도체에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다. 금속계 초전도체와 달리 세라믹계 초전도는 120K의 온도에서 초전도체 성질을 낸다. 이로 인해 상업적인 적용이 더욱 용이해졌

고, 세라믹계 초전도에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다.<sup>(1)</sup>

이러한 세라믹계 초전도체 물질 중 대표적인 초전도체 물질이 임계온도 BSCCO 계열 즉, 임계온도 110K, 조성(Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-o)을 가지는 물질이다. 세라믹계 초전도체는 금속계 초전도체에 비해 더욱 높은 온도에서 초전도 성질을 나타내는 큰 장점이 있는 반면, 가공에 있어 많은 어려움을 나타낸다. 세라믹계 재료를 이용한 제조를 위해 powder의 형태로 재료를 만들고 이를 이용하

\* 부산대학교 대학원 정밀기계공학과  
\*\* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소  
\*\*\* 한국전기연구원 초전도선재그룹

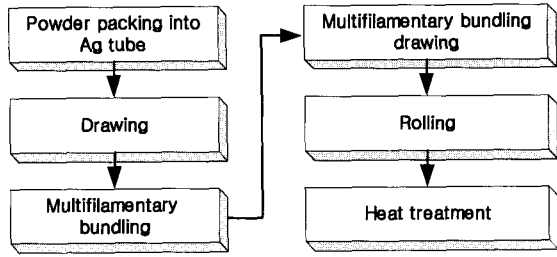


Fig. 1 Process procedure for Bi2223 superconductor

여 제품을 생산함으로써 제조가 힘들고 많은 공정을 거치는 단점이 있다. 일반적으로 Bi2223/Ag 초전도체의 대부분은 powder-in-tube (PIT) 법으로 제조된다.<sup>(2)</sup>

PIT 법이란, tube(Ag) 안에 세라믹계 물질을 Powder의 형태로 넣어 이중 선재의 형태로 사용하는 방법이다. 이로써, 분말체를 가공할 수 있게 된다. PIT 법에 의해 만들어진 소재는 인발, 롤링 등의 기계적 변형 공정을 거쳐 최종 제품인 테이프의 형태로 제조되어진다. 즉, PIT 법에 의한 가공은 tube(Ag)안에 powder를 넣어 인발 공정을 실시하는 단심 필라멘트 선재의 인발 공정, 단심 필라멘트 선재의 인발 공정을 거쳐 직경이 작아진 필라멘트 선재를 다시 하나의 큰 tube(Ag)안에 넣어 인발 공정을 거치는 다심 필라멘트 선재 인발 공정을 거친다. 그 후 최종적으로 롤링 공정을 통해, 테이프 형태의 최종 제품을 생산하게 된다. Fig. 1은 Bi2223 초전도 선재의 제조 공정 절차를 나타낸 그림이다.

이렇게 제조되어지는 초전도 선재에 있어서 중요한 것은 높은 최적 전류 밀도값을 유지하는 것이다.<sup>(3)</sup> 이는 초전도 선재가 더욱 많은 전류를 보낼 수 있는 특성으로 최종 초전도 선재의 특성을 좌우하는 요소이며 초전도 선재의 품질을 결정짓는 요인이다. 따라서 전 세계적으로 최적 전류 밀도값을 높이기 위해서 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중 인발, 롤링의 가공 공정 시 각종 결함을 줄이고, core의 밀도를 높이고 core의 균등성을 높이는 방법, 단선의 발생을 줄이는 가공 조건을 설정하는 것이 중요한 과제이다. 본 연구 전에 단심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 나타나는 결함 중의 하나인 소재징에 대한 연구를 수행하였다.<sup>(4)</sup>

본 연구에서는 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에 대한 유한요소해석을 통해, 다심 필라멘트 선

재의 인발 공정 시 나타나는 문제점 및 결함에 대해 알아보려고 한다. 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에 대해 Z. Han etc는 초전도체의 기계적 제조 공정에 대해 거시적인 연구를 하였다.<sup>(5)</sup> 이 연구에서 Z. Han 등은 PIT 선재를 가공하기 위한 최적의 공정을 선택하기 위해 압출, 인발, 롤링, 프레스 공정에 대해 연구하였고 각 공정에 대해 평가하였다.

하지만, 아직까지 유한요소해석 등을 통한 이론적인 정립은 이루어지지 않고 실험적인 결과를 통한 연구만이 진행되고 있다. 특히 다심 필라멘트 선재의 경우 FE 해석 모델링 자체가 힘들고, FE 해석을 위한 물성치 등의 정립이 되지 않아 유한요소 해석을 통한 이론적인 접근은 거의 이루어지지 않고 있다. 이러한 상황은 PIT 법의 특성상 높은 재료비에 의한 연구 경비 증가 등의 문제점을 나타낼 수 있고, 이론적인 정립이 없어 각종 문제점에 대한 대책 수립에 어려움을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 다심 필라멘트 선재의 인발 공정을 해석하고 이 때 나타나는 각종 문제점을 분석하여 다심 필라멘트 인발 공정에 대한 대책을 마련하고자 한다.

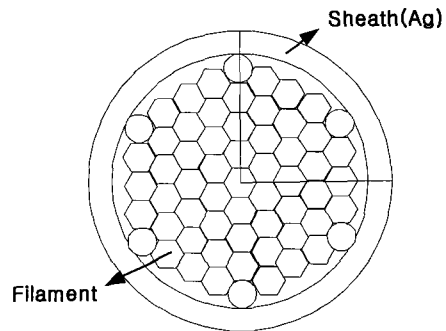


Fig. 2 Schematic of multi-filament drawing

## 2. 고온 초전도 재료의 기계적 성질

고온 초전도 재료를 이용하여 FEM 해석을 수행하기 위해서는 Bi2223 소재의 유동 응력식과 상대밀도, Ag의 유동 응력식, 두 소재 사이의 마찰계수에 대한 값을 구해야만 한다. 실제 단심 인발된 필라멘트의 직경이 매우 작고, 육각의 형태로 되어 있어 인발된 powder의 개별 유동 응력식을 구하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 단

심 인발된 필라멘트의 core 재와 sleeve 재를 하나의 object 로 보고 전체의 유동 응력식을 도출하였다. 이러한 방법은 실제 측정의 어려움을 해결하기 위하여 Michinaka Sugano 등 많은 연구자들이 사용하는 방법이기도 하다.<sup>(6)</sup> 단심 필라멘트 선재의 응력-변형률 관계식을 구하기 위해 인장 시험을 수행하였으며, 충진밀도는 4.4g/cm<sup>3</sup> 이다. 그 결과는 다음과 같다.

$$\sigma = 160.61 \cdot \varepsilon^{0.0167} \text{ (MPa)}$$

또한, sleeve 재인 Ag-0.2%Mg 를 사용하였으며, 응력-변형률 관계식은 아래와 같다.

$$\sigma = 350 \cdot \varepsilon^{0.11} \text{ (MPa)}$$

인발 공정에서 소재와 다이 사이의 마찰은 소재의 기계적인 변형거동에 많은 영향을 미칠 수 있다. 소재와 다이 사이의 마찰계수를 직접 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로 실제 작업 현장의 인발력으로부터 마찰계수를 구하는 Geleji의 식을<sup>(7)</sup> 이용하여 마찰계수를 구하였다. 본 연구에서 윤활제로 사용한 DH-Draw1130C 에 대한 마찰계수의 값은 0.15 이다..

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석 모델

본 연구에서 실시하는 다심 필라멘트 선재의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서처럼 다심 필라멘트 선재의 다심 개수는 55 심으로 실시하였고, 해석상의 편의를 위해 Fig. 3처럼 1/4단면으로 해석을 수행하였고, FE 해석의 시간을 단축시키고 해석을 가능하게 하기 위해 다심의 심들을 하나의 object로 간주하여 단심에서 실험을 통하여 구한 유동응력식을 적용시켜 해석하였다. 또한 Ag tube와 단심 필라멘트 사이에 Ag를 삽입하여 끼워 넣었다.

#### 3.2 유한요소해석 조건

본 연구의 성형 해석을 위해 강소성 유한요소 해석 코드인 DEFORM 3D를 사용하였다.<sup>(8)</sup> 상온에서 해석을 수행하였고, 다이반각, 단면 감소율 등의 인발 공정 변수는 Table 1에 나타내었다.

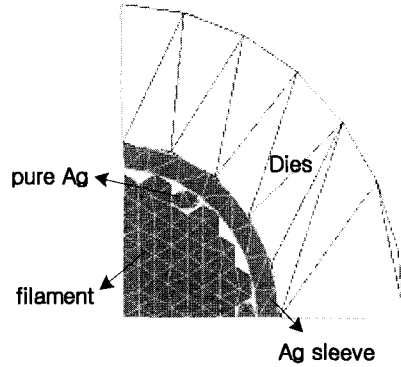


Fig. 3 Shape of 1/4 section FE model

Table 1 Multi-filament drawing condition

Drawing condition	value
Reduction in area(%)	15
Semi-die angle(°)	6
Friction factor(μ)	0.15
Initial temperature(°C)	20

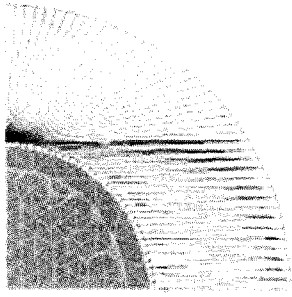
## 4. 해석 결과

### 4.1 단면 형상의 변화

Fig. 4는 다심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 filament의 변형 형상을 보여주는 그림이다. 시작시의 단면은 슬리브와 필라멘트들 사이에 틈이 존재한다.

하지만, 패스가 진행되면서 그 틈은 채워지고, 최외각 필라멘트들부터 변형이 일어나기 시작한다. 이 때, 틈에 삽입하는 Ag는 최외각 필라멘트의 틀어지는 변형을 막는데 유익하다고 판단된다. 특히, 슬리브와 접촉하는 부분의 최외각 필라멘트는 단지 초기 패스에서 많은 변형을 나타낸다.

Fig. 5는 다심 필라멘트 선재의 끝단부 형상을 나타낸 그림이다. 다심 필라멘트 선재의 끝단부 형상을 보면 슬리브재와 필라멘트재 사이의 미끄럼에 의해 접합부의 필라멘트가 중심부의 필라멘트 보다 많이 미끄러짐을 확인할 수 있다. 이는 완전히 접합하지 않은 이중 선재에서 나타나는 현상과 비슷한 현상으로 결과적으로 이런 미끄럼에 의해 접합부의 필라멘트 선재는 변형과 동시에



(a) During a multi-filament drawing process

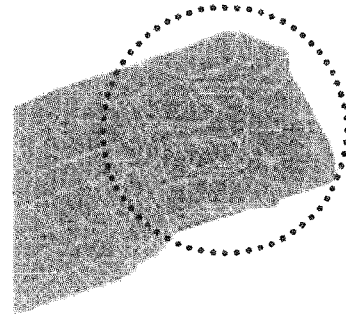
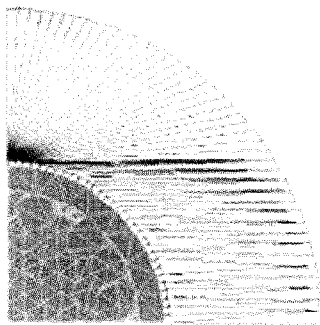


Fig. 5 Shape of end section after drawing



(b) After a multi-filament drawing process  
Fig. 4 Deformation of multi-filament wire



Fig. 6 Shape of boundary section

부피의 감속적 현상을 겪게 된다.

따라서, 다심 필라멘트 선재의 bunding 공정시 좀더 강한 bunding을 하는 것이 필요하다. Fig. 6은 슬리브와 슬리브 접촉부에서의 필라멘트 변형을 설명하기 위한 그림이다. 인발 공정은 다이에 의해 변형이 됨으로써, 슬리브와의 접촉부부터 필라멘트의 변형이 심하게 일어난다. 그로 인해, 바깥부 필라멘트의 형상 변화가 심하게 일어남을 볼 수 있다.

## 4.2 각종 결과 값에 대한 분석

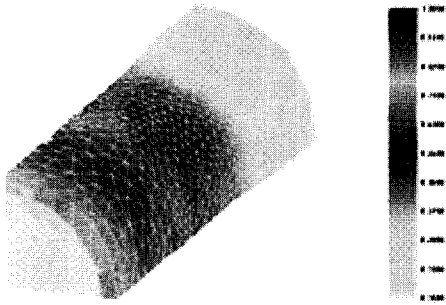
### 4.2.1 strain 값의 분포

Fig. 6(a)는 다심 필라멘트 선재에 있어서 변형률 값의 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 6(b)는 다심 필라멘트 선재의 단면에서 초기 단면과 인발 후 단면의 변형률 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 다심 필라멘트 선재는 처음에 슬리브채부터 많은 변형을 받는다.

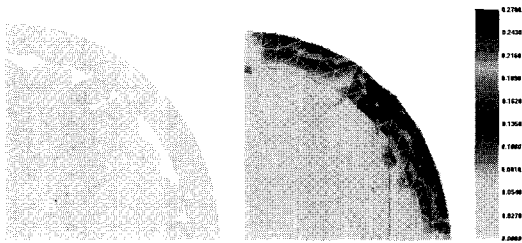
중심부의 필라멘트에 변형을 받는 것은 패스가 많이 진행된 후 선재의 직경이 작아진 이후부터라고 할 수 있다. 따라서 초기에 선재의 슬리브채가 많은 가공경화를 받게 되고 이러한 경우는 슬리브채가 hard 한 클래드 선재와 유사한 경우가 된다. 슬리브채가 hard 한 경우, 선재의 단선 및 sausageing 등의 결함을 가져 올 수 있다. 따라서, 다심 필라멘트 선재의 인발 공정 시, 적절한 시기에 열처리를 하는 것이 중요하다고 판단된다.

### 4.2.2 damage 값의 분포

Damage 값은 냉간 forming 에서 fracture 예견 하는데 사용된다. 즉, damage factor 가 한계값에 도달할 때 fracture 가 발생한다. Damage factor( $D_f$ )의 한계값은 물리적인 실험을 통해 결정되어지며, 이 값을 통해, 재료의 결함을 예측할 수 있다.<sup>(9)</sup>



(a) Strain distribution of multi filament



(b) Strain distribution during a drawing process

Fig. 7 Strain distribution of multi filament

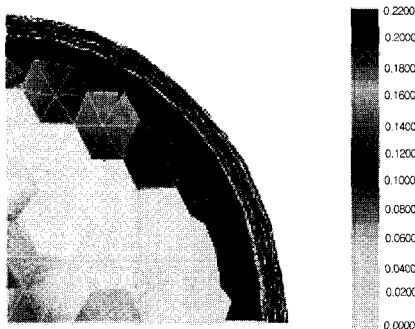


Fig. 8 Damage distribution of multi filament

Damage factor( $D_f$ )는 다음과 같이 정의 된다.

$$D_f = \int \frac{\sigma^*}{\sigma} d\varepsilon$$

$\sigma^*$  : tensile maximum principal stress

$\sigma$  : effective stress

$d\varepsilon$  : effective strain increment

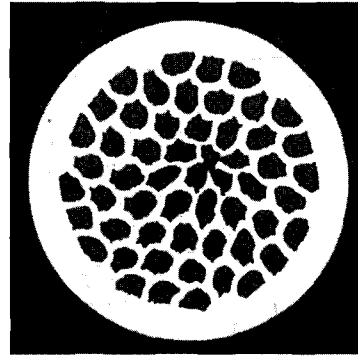


Fig. 9 Bursting at center of multi filament

결과적으로 damage 값이 높게 나온다면, 그 부분의 결함 발생확률 높다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 다심 필라멘트 선재의 damage 분포를 나타낸다. Fig. 8에서 유심히 보아야 할 부분 중의 하나가 중심부에 쌓이는 damage 값이다. 단일 선재의 인발 공정 시, damage 값은 중심부에서 최고 값을 나타낸다. 이 때문에, 단일 선재에서는 중심부에 Cuppy 단선 등의 결함이 발생한다. 다심 필라멘트 선재에서 흥미로운 부분은 마찬가지로 다심 필라멘트 선재에 있어서도 중심부의 damage 값이 높게 나온다는 것이다. Sleeve 재와 접하는 부분의 필라멘트와 중심부의 필라멘트에 damage 값이 높게 나타나고 결과적으로 패스 진행 후, 필라멘트재의 한계 damage 값을 초과할 경우, 결함이 발생한다. 이 경우, 선재 중심부의 결함 확률이 높고, 실제 공정에선 중심부에서 powder가 터져 뭉치는 경우가 발생할 확률이 높다고 판단된다.

Fig. 9는 실제 공정에서 발생한 다심 필라멘트 선재의 결함을 나타낸 그림이다. 다심 필라멘트 선재의 중심부에서 powder가 뭉치는 현상을 볼 수 있다. 이러한 결함은 최종 선재의 최적 전류 밀도값을 감소시키는 원인이 된다.

본 연구에서는 다심 필라멘트 선재의 인발 시 중심부의 결함을 해결하기 위해, 중심부에 다심 필라멘트 선재 대신 순수 Ag를 삽입하였다. 순수 Ag의 삽입한 경우, 다심 필라멘트 선재에 한계 연성파단값이 높아지기 때문에 중심부의 결함을 줄일 수 있다. 따라서 중심부에 한계 연성파단값이 높은 재료를 삽입하는 것은 중심부에서 powder가 뭉쳐 터지는 것을 방지할 수 있는 좋은 대책이라 판단된다.

## 5. 결론

고온 초전도 선재의 제조 공정 중 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에 대해 연구하였다. 실제 다심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 많은 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여, 실제 공정에서 발생할 수 있는 문제점을 진단하였고, 대책을 제시하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 다심 필라멘트 선재의 FEM 해석을 위해, 단심 필라멘트 선재의 응력-변형률 관계식을 구하였고, 그 값은  $\sigma = 160.61 \cdot \varepsilon^{0.0167}$  이다. 또한, 다이와 필라멘트 사이의 마찰계수는 0.15의 값을 얻었다.

(2) FEM 해석 결과 최외각 필라멘트와 sleeve의 미끄럼이 많이 일어남을 확인할 수 있었다. 따라서, 다심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 각 필라멘트와 sleeve 사이의 접합면의 상태를 개선하는 것이 중요하다. 그러므로 필라멘트의 bonding 공정 시 좀더 강하게 bonding하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

(3) 다심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 sleeve 재부터 가공을 하기 시작하므로 sleeve 재가 과도한 가공 경화를 받게 된다. Sleeve 재의 과도한 가공경화는 각종 결함을 일으킬 수 있으므로, 적절한 시기에 열처리를 하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 또한 core의 밀도를 높이므로, core의 균등성과 내부 결함을 방지하고, 최적 전류밀도를 높일 수 있을 것이다.

(4) 다심 필라멘트 선재에서도 일반 선재의 인발 공정처럼, 중심부에 damage가 집중됨을 볼 수 있다. 이로 인해 중심부의 결함(여기서는 중심부에서, powder가 터지는 현상)이 일어날 수 있고 이런 결함은 초전도 선재의 최적 전류밀도 값을 감소시키는 원인이 된다. 따라서 중심에 Ag를 삽입하여 한계 연성파단값을 높여 중심부의 결함을 방지하는 것은 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에서 좋은 방법이 된다고 판단된다. 또한, 실제 공

정에 적용한 결과 중심부의 결함을 방지할 수 있었다.

## 참고 문헌

- (1) R. D. Blaugher., July 1998, "Prospects for superconducting electric powder applications", The 1998 International Workshop on Superconductivity, Okinawa, Japan, pp. 13~16.
- (2) K. Osamura, S. S. Oh and S. Ochiai., 1992, "Work instability and its influence on the critical current density of silver sheathed Bi2223 tapes", Supercond. Sci. Technol., Vol. 5, pp. 1~6.
- (3) W. G. Wang, et al., 2001, "Engineering Critical Current Density Improvement in Ag-Bi2223 tapes", IEEE Trans. Appl. Supercon., pp. 2983~2986.
- (4) 박동인, 김병민, 오상수, 하홍수, 2003, "Bi(Pb)-2223 초전도 선재에서 소세징에 대한 인발 공정 변수의 영향," 2003년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 311~314.
- (5) Z. Han, P. Skov-Hansen and T. Freltoft., 1977, "The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag composites", Supercond. Sci. Technol, Vol. 10, pp. 371~387.
- (6) M. Sugano, K. Osamura and S. Ochiai., 2001, "Influence of Dynamic and Static Stresses to Mechanical and Transport Properties of Ag/bi2223 Composite Superconductors", IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 11, No. 1, pp. 3022~3025.
- (7) ALEXANDER GELEJI, "BILDSAME FORMUNG DER METTALE IN RECHNUNG UND VERSUCH", AKADEMIE-VERLAG GmbH, BERI.
- (8) SFTC, "DEFORM-3D user manual".
- (9) M. G. Cockcroft and D. J. Latham., 1968, "Ductility and the Workability of Metals", journal of the Institute of Metals, Vol. 96, pp. 33~39.