한국소성가공학회 2003 년도 추계학술대회 논문집 pp.273~276

유한요소법에 의한 Bi2223 고온 초전도 선재의 다심 인발에 대한 연구

박동인* · 김병민** · 오상수***

Study for multi-filament drawing of Bi2223 high-temperature superconductivity wire by FE method

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

Abstract

High-temperatrue superconduction materials(Bi2223) possess electrical/electronic and magnetic properties. Because high-temperature superconduction materials is a ceramic powder, that can not 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. Bi2223 high-temperature superconductivity have a single filament drawing process, and multi-filament drawing process. This study analysed multi-filament drawing process by FEM, a defects during multi-filament drawing was studied by FEM.

Key Words : Bi2223 high-temperature superconductivity , multi-filament drawing, FEM, drawing process, PIT Drawing defect, damage value

1. 서 론

완전 도전성 및 완전 반자성의 성질을 갖는 초전도 물질이 발견된 이래, 초전도에 대한 많은 연구가 있었다. 초기에 금속계 초전도체에 대한 연구를 바탕으로 1980 년대 세라믹계 초전도 물질이 발견됨으로써 초전도체에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있다. 금속계 초전도체와 달리 세라믹계 초전도는 120K 의 온도에서 초전도체 성질을 낸다. 이는 상업적으로의 적용이 더욱 가능해져 세라믹계 초전도에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 이러한 세라믹계 초전도체 물질 중 대표적인 초전도체 물질이 BSCCO 계열의 물질이다. 세라믹계 초전도체는 금속계 초전도체에 비해 더욱 높은 온도에서 초전도 성질을 나타내는 큰 장점이 있는 반면, 가공에 있어 많은 어려움을 나타낸다. 세라믹계의 재료를 이용한 제조를 위해 powder 의 형태로 재료를 만들고 이를 이용하여 제품을 생산함으로써 제조가 힘들고 많은 공정을 거치는 단점이 있다. 일반적으로 Bi2223/Ag 복합재들의 대부분은 powder-in-tube (PIT) 법으로 제조된다. PIT 법이란, tube(Ag) 안에 세라믹계 물질을 powder 의 형태로 넣어 이중 선재의 형태로 사용하는 방법이다. 이로써, 분말체를 가공할 수 있게 되는 방법이다. PIT 법에 의해 만들어진 소재는 인발,

* 부산대학교 精密기계공학과
** 부산대학교 精密정형 및 금형가공연구소
*** 한국전기연구원 초전도선재그룹

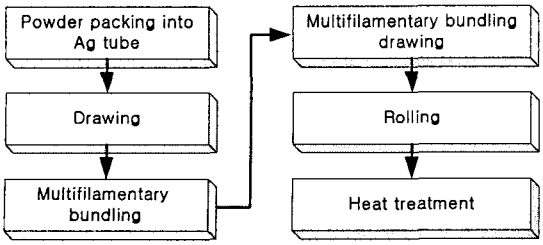

Fig. 1 Process procedure for Bi2223 superconductor

롤링 등의 기계적 변형 공정을 거쳐 최종 제품인 테이프의 형태로 제조되어진다. 즉, PIT 법에 의한 가공은 tube(Ag)안에 powder 를 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 단심 필라멘트 선재를 넣어 인발 공정을 거치는 다심 필라멘트 선재 인발 공정을 거친다. 그 후 최종적으로 롤링 공정을 통해, 테이프 형태의 최종 제품을 생산하게 된다.

이렇게 제조되어지는 초전도 선재에 있어서 중요한 것은 높은 최적 전류 밀도값을 유지하는 것이다. 이는 초전도 선재가 더욱 많은 전류를 보낼 수 있는 특성으로 최종 초전도 선재의 특성을 좌우하는 요소로서 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, 단선의 발생을 줄이는 가공 조건을 설정하는 것이 중요한 과제이다. 본 연구전에 단심 필라멘트 선재의 인발 공정 시 나타나는 결함 중의 하나인 소세징에 대한 연구를 수행하였다.[1]

본 연구에서는 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에 대한 유한요소해석을 통해, 다심 필라멘트 선재의 인발 공정시 나타나는 문제점 및 결함에 대해 알아보고자 한다. 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에 대해 Z. Han etc 는 초전도체의 기계적 변형공정에 대해 거시적인 연구를 하였고[2], 아직까지 유한요소해석 등을 통한 이론적인 정립은 이루어지지 않고 실험적인 결과를 통한 연구만이 진행되고 있다. 이는 PIT 법의 특성상 높은 재료비에 의한 연구 경비 증가 등의 문제점을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 다심 필라멘트 선재의 인발 공정을 해석하고 이 때 나타나는 각종 문제점을 분석하여 인발 공정에 대한 대책을 마련하고자 한다.

2. 고온 초전도 재료의 기계적 성질

고온 초전도 재료를 이용하여 FEM 해석을 수행하기 위해서는 Bi2223 소재의 유동 응력식과 상대밀도, Ag 의 유동 응력식, 두 소재 사이의 마찰계수에 대한 값을 구해야만 한다. 실제 단심 인발된 필라멘트의 직경이 매우 작고, 육각의 형태로 되어 있어 인발된 powder 의 개별 유동 응력식을 구하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서는 단심 인발된 필라멘트의 core 재와 sleeve 재를 하나의 object 로 보고 전체의 유동 응력식을 도출하였다. 이러한 방법은 실제 측정의 어려움으로 Michinaka Sugano 등 많은 연구자들이 사용하는 방법이기도 하다.[3] 단심 필라멘트 선재의 응력-변형률 관계식을 구하기 위해 인장 시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

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

또한, 슬리브재인 Ag 는 0.2% 마그네슘 합금 Ag 를 사용하였으며, 응력-변형률 관계식은 아래와 같다.

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

인발 공정에서 소재와 다이 사이의 마찰은 소재의 기계적인 변형거동에 많은 영향을 미칠 수 있다. 소재와 다이사이의 마찰계수를 직접 측정하는 것은 현실적으로 매우 어려우므로 실제 작업 현장의 인발력으로부터 마찰계수를 구하는 Geleji 의 식[4]을 이용하여 마찰계수를 구하였다. 본 연구에서 윤활제로 사용한 DH-Draw1130C 에 대한 마찰계수의 값은 0.15 이다.

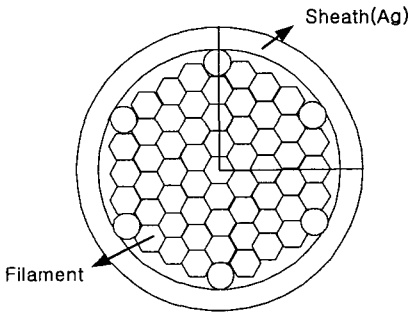

Fig. 2 Schematic of multi-filament drawing

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델

본 연구에서 실시하는 다심 필라멘트 선재의 형상을 Fig .2.에 나타내었다. 그림에서처럼 다심 필라멘트 선재의 다심 개수는 55 심으로 실시하였고, 해석상의 편의를 위해 Fig. 3 처럼 1/4 단면으로 해석을 수행하였다. 실제는 단심 필라멘트 선재는 Ag tube 안에 powder 가 있는 형상이지만, 물성치의 측정 곤란과 해석상의 편의를 위해, 하나의 object 로 잡고 해석을 수행하였다.

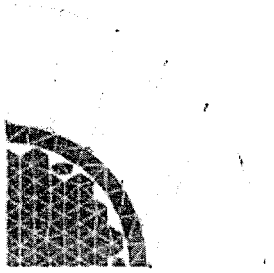

Fig. 3 Shape of 1/4 section FE model

3.2 유한요소해석 조건

본 연구의 성형 해석을 위해 강소성유한요소해석 코드인 DEFORM 3D 를 사용하였다.[5]

상온에서 해석을 수행하였고, 다이반각, 단면 감소율 등의 인발 공정 변수는 Table. 1 에 나타내었다.

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

시작시의 단면은 슬리브와 필라멘트들 사이에 틈이 존재한다. 하지만, 패스가 진행되면서 그 틈은 채워지고, 최외각 필라멘트들부터 변형이 일어나기 시작한다. 이 때, 틈에 삽입하는 Ag 는 최외각 필라멘트의 틀어지는 변형을 막는데 유익하다고 판단된다. 특히, 슬리브와 접촉하는 부분의 필라멘트는 단지 초기 패스에서도 많은 선재의 변형을 보이게 된다.

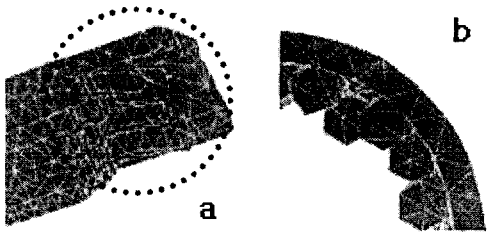

Fig. 4 (a) Shape of end section after drawing
Fig. 4 (b) Shape of boundary section

Fig. 4(a)는 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 결과적으론 이런 미끄럼에 의해 접합부의 필라멘트 선재는 변형과 동시에 부피의 감속적 현상을 겪게 된다. 따라서 다심 필라멘트 선재의 인발 공정에서는 접합면의 접합 상태를 좀더 개선하는 것이 중요한 과제 중의 하나라고 판단된다. Fig. 4(b)는 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. 5 는 다심 필라멘트 선재에 있어서 strain 값의 분포를 나타낸 그림이다. 다심 필라

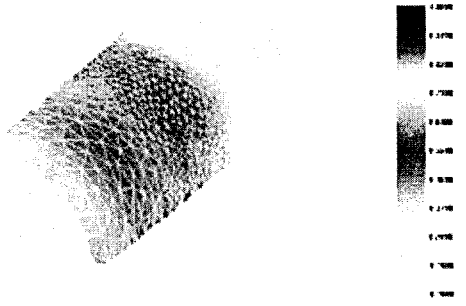

Fig. 5 Strain distribution of multi filament

멘트 선재는 처음에 슬리브재에 많은 변형을 받는다. 중심부의 필라멘트에 변형을 받는 것은 패스가 많이 진행된 후 선재의 직경이 작아진 이후부터라고 할 수 있다. 따라서 이러한 경우, 초기에 선재의 슬리브재가 hard 한 경우와 유사하게 된다. 이 경우 슬리브재의 결함을 가져올 수 있으며, 많은 가공경화를 피하기 위해서 적절한 시기에 열처리가 필요하다.

4.2.2 damage 값의 분포

Damage 값은 냉간 forming 에서 fracture 를 예견하는데 사용된다. 즉, damage factor 가 한계값에 도달할 때 fracture 가 발생한다. Damage factor 의 한계값은 물리적인 실험을 통해 결정되어지며, 이 값을 통해, 재료의 결함을 예측할 수 있다.

Fig. 6 에서 유심히 보아야 할 부분 중의 하나가 중심부에 쌓이는 damage 값이다. 단일 선재의 인발시, damage 값은 중심부에서 최고값을 나타낸다. 이 때문에, 단일 선재에서는 중심부에 Cuppy 단선 등의 결함이 발생한다. 다심 필라멘트 선재에서 흥미로운 부분은 다심 필라멘트 선재에 있어서도 중심부의 damage 값이 높게 나옴을 알 수 있다. 슬리브재와 접하는 부분의 필라맨트와 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 powder 가 터져 뭉치는 경우가 발생할 확률이 높다고 판단된다. 따라서 중심부에 한계 damage 값이 높은 재료를 삽입하는 것은 중심부에서 powder 가 뭉쳐 터지는 것을 방지할 수 있는 좋은 대책이라 판단된다.

Fig. 6 Damage distribution of multi filament

5. 결 론

이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다..

(1) 다심 필라멘트 선재의 인발 공정시 각 필라멘트와 슬리브 사이의 접합면의 상태를 개선하는 것이 중요하다. 따라서 선재의 Packing 시 좀 더 compact 하게 packing 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

(2) 다심 필라멘트 선재의 인발 공정시 슬리브재가 너무 과도하게.가공 경화되는 것을 피해야 한다. 따라서 적절한 시기에 열처리를 하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

수 있다.

(3) 다심 필라멘트 선재에서도 일반 선재의 인발 공정처럼, 중심부에 damage 가 집중됨을 볼 수 있다. 이로 인해 중심부의 결함(여기서는 중심부에서, powder 가 터지는 현상)이 일어날 수 있다. 따라서 중심에 Ag 를 첨가하여 중심부의 damage 값을 낮추는 것이 좋은 방법이라 판단된다..

참 고 문 헌

(1) 박동인, 김병민, 오상수, 하홍수, 2003, "Bi(Pb)-2223 초전도 선재에서 소세징에 대한 인발 공정 변수의 영향," 2003 년도 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 311~314

(2) 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.

(3) Michinaka Sugano, Kozo Osamura and Shojiro Ochiai., 2001, "Influence of Dynamic and Static Stresses to Mechanical and Transport Properties of Ag/bi2223 Composite Superconductors", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDU CTIVITY, Vol. 11, No. 1, pp. 3022～3025.

(4) ALEXANDER GELEJI, "BILDSAME FORMUN G DER METTALE IN RECHNUNG UND VERSUCH", AKADEMIE-VERLAG GmBH,BERI

(5) SFTC, "DEFORM-3D user manual"