

**Ag-sheath Bi-2223 고온 초전도 선재 AC 손실 해석에 따른 설계 및 제작**

장미혜, 추용, 이준영, 고태국  
연세대학교 전기공학과

**The Design and Manufacture by Analysis of AC Loss of high temperature superconductor wire of Ag-sheath Bi-2223**

Mi Hae Jang, Yong Chu, Joon Young Lee, Tae Kuk Ko  
Dept. of E.E. Yonsei University

**Abstract** -In future superconducting electrical machines and device. AC loss in the superconducting windings are one of the most impotent design paramenters. This paper descriptions a series of Characteristic of a high-Tc superconducting Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O Ag-sheathed filament. In the case simulation and design to reduce ac loss is considered the filament number, twitch pith number and diameter of filament. A filament sample with Tc of 78K is made by 835 ° C sintering for 50h and 0.33 ° C/min heating rate in an atmosphere. The experiment observations are compared with self-field loss and AC losses of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O filament at 77K in following environments ; (i)AC external parallel magnetic field in different frequencies. And an analytical expression of the loss the derivation of transposition from an optimum condition was derived for the external AC magnetic field. theoretical predictions were found to coincide with the experimental observations.

**1. 서 론**

임계온도, 임계자장, 임계전류밀도가 높은 제2종 초전도체의 응용은 초전도 전원 공급장치, 초전도 전류제한 장치, 대용량 초전도자석 등이[1] 있다. 특히 자기공명영상장치(Magnetic Resonance Imaging), 초전도 자기 에너지저장장치(Superconducting Magnetic Energy Storage Device)와 초전도 교류 발전기 등이 있다. 그러나 응용분야에서 공통적으로 가지고 있는 문제점은 시변 자계를 가할 경우 교류손실이 발생한다. 교류 자계와 전송전류를 인가할 경우는 로렌츠 힘에 의한 기전력으로 손실이 발생한다. 교류 손실로 발생하는 교류 손실로 발생하는 열은 초전도 시스템의 온도를 상승시키기 때문에 초전도 시스템을 쿼치시킬 가능성이 있다. Cornot-cycle이론에 의하면 액체 헬륨에서 발생한 1W의 발생열을 제거시키기 위해서 70W 정도의 냉각시스템 전력이 필요하지만 실제로는 효율 문제 때문에 수백 W가 필요하다.[2] 교류손실에는 초전도체 자화 특성에 의한 히스테리시스 손실과 복합 다심 초전도체에서의 커플링(coupling)손실 제2종 초전도 특성에 의한 와전류(eddying)손실 그리고 전송 전류에 의해 발생하는 자체 자계에 의한 손실 등이 있다.[3] 그리고 교류 손실은 초전도체의 종류 및 모양, 인가 자계의 방향 및 크기 주파수 등에 따라 복잡하게 발생한다.

**2. 본 론**

본 연구에서는 선재 시물레이션을 Londen-Bean 모

델로 가정하고 교류 자계에 유가되는 전류밀도는 일정한 Jc가 흐른다고 가정하고 교류 자계에 의해 유가되는 내부 전계를 맥스웰 방정식에 의해 구한 후 선재의 교류손실 절감을 위한 설계를 하기 위하여 그리고 항 후 횡방향으로 교류 자계를 인가시 부분 직류 전송전류 인가시의 히스테리시스 손실, 복합 다심 초전도 선재를 모델로 응용시 임계전류에 대한 최적치의 자장과 초전도체의 반경등을 고려한 최적 설계 조건을 찾고자 하였다. 최적 설계라고 설계한 초전도체 필라멘트가 이론적인 접근에 근거한 열처리 조건, 인발, 압연과정 후 시험 데이터를 얻으려 한다.

**2.1 시물레이션**

초전도체 시스템에서 효율을 향상시키고 안정도를 높이는 데 것이 큰 문제로 부각되는데, 그것을 만족하기 위한 것으로써 히스테리시스 손실, Coupling 손실, 와전류 손실, Splice 손실과 기계적인 손실 등을 줄이는 연구가 가장 중요한 요인들이다. 그러므로 본 연구에서는 선재 시물레이션을 Londen-Bean 모델에서 가정하고 교류 자계에 유가되는 전류밀도는 일정한 Jc가 흐른다고 가정하고, 교류 자계에 의해 유가되는 내부전계를 맥스웰 방정식에 의해 구한 후 히스테리시스 손실을 산출하였다.

**2.2 선재 제작**

은 튜브에 충전시키기 위한 분말을 혼합 후 Y계 산화물 초전도체의 분말 비와 하소 시간등은 최적화가 이루어져있으나, 분말 조성이 많은 BSCCO계 초전도체는 그 최적비율을 형성하기 위해서 상당한 어려움이 따른다. 일반적인 다심 선재 제조 공정 순서는 그림1과 같다.

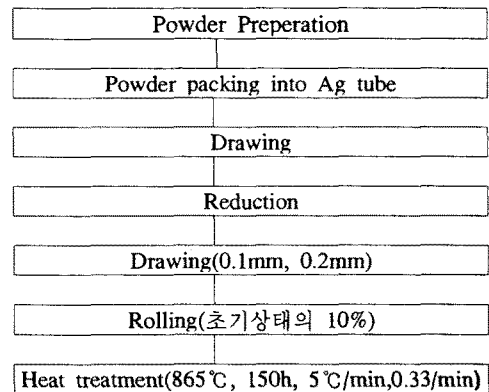


그림1. 다심 선재의 제작과정

Fig. 1 Manufacture process of multifilament

## 2- 2-1 BiPbSrCaCu 테이프 선재 공정 특성

1) 19심 이상의 필라멘트 갯수, 10 $\mu$ m이하의 필라멘트 직경 그리고 25%이상의 filling ratio를 갖는 형태를 취하도록 하였다.

2) 전송전류의 감소없이 10mm정도 내에서의 핏치를 갖는 필라멘트의 트위스트를 하고자했지만 이번에 제조된 선재는 트위스트시키지 않는 직류용 다심 선재를 제작하였다.

3) 필라멘트간의 전기저항을 증가시키기 위한 피복재로써 Ag를 사용하여 열처리시 고온 초전도체의 결정구조에서 산소의 함유량에 의한 초전체 구조의 페로브스카이트형의 구조를 갖는 공정을 하도록 하였다.

4) 열적 안정성을 확보하기 위해 전기 전도성을 유지하며, 열처리시 필라멘트와 산소의 결합이 잘 이루어지는 피복재를 선택하기 위해서 Ag를 사용하였다.

## 2-2-2 실험 준비물

멀티 필라멘트를 만들기 위한 구성은 표1과 같다.

표 1. 선재공정 실험구성 항목

Table 1 Filament manufacture composition items

Component	규격
Ag rod	순도 (99.9%)
10%Ag/Bi2223	Bi <sub>1.89</sub> : Pb <sub>0.41</sub> : Sr <sub>2.01</sub> : Ca <sub>2.23</sub> : Cu <sub>3.03</sub>
Alumina sleeve (Alumina tape)	너비: 2mm ~ 5mm, 두께: 0.1mm ~ 0.2mm
Alumina rod	보빈용
Silver foil	순도 (99.9%)
비이커, 수저, 비닐, 목장갑	
인발기	최소 1mm Dimension까지 인발가능
압연기	0.15mm ~ 0.2mm 압연 가능
Furnace	Anealing, Sintering

## 2-2-3 분말 제조 공정

1) Bi2223 성분비는 표2와 같다.

표 2. Bi<sub>1.89</sub>: Pb<sub>0.41</sub>: Sr<sub>2.01</sub>: Ca<sub>2.23</sub>: Cu<sub>3.03</sub>의 성분비

Table 2 Composition Bi<sub>1.89</sub>: Pb<sub>0.41</sub>: Sr<sub>2.01</sub>: Ca<sub>2.23</sub>: Cu<sub>3.03</sub>

99.99	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	62.904 [g] × 2
99.99	PbO :	13.074 [g] × 2
99.99	SrCO <sub>3</sub> :	42.391 [g] × 2
99.99	CuO :	34.432 [g] × 2
99.99	CaO :	17.865 [g] × 2
Total Quantity		170.666 × 2 [g]

2) 볼 밀링 (Ball milling)

볼 밀링은 분말이 미세하게 된 후 여러 차례의 공정들을 거친 후 초전도 특성을 잘 나타낼 수 있도록 하는 것으로서 밀링 조건은 Weighing powder (170.666 [g]) + ZrO<sub>2</sub> ball (5mm  $\phi$ : 320 [g]) + EtOH (Quality : 99.9%, 300ml) 하고 밀링 시간 (Milling time) :

24hr 동안 250rpm으로 한다. 또한 밀링이 잘 되도록 하기 위해서 첨가된 성분을 제거하기 위해서 60 °C의 오븐에서 약 30분 정도 건조시킨다. 다시 한번 sieve 180 $\mu$ m의 구경의 가는 슬레이브 (sieve)로 그라이딩 (Mortar grinding) 하여 준다

## 2-2-4 선재 인발 및 압연 과정

은 튜브 (Ag tube)에 분말을 패킹 (packing) 한다. 은 튜브는 내경이 6.5mm를 사용하여 다심 선재 최종 1mm를 얻기 위해서 인발 (Drawing) → 스테킹 (Staking) → 인발 Drawing (1mm  $\phi$ ) 방법으로 행하였다 압연 공정 순서는 다음과 같다.

1) Bi2223 rod 19개는 inner diameter가 6.5mm (outer diameter : 6.5mm)인 은 파이프에 넣고 200MPa의 압력으로 C.I.P를 하였다.

2) 이것을 10% reduction을 유지하면서 인발하여 외경이 1mm가 되었을 때, 650 °C에서 60min간 anealing을 하였다. 최종 인발 직경이 0.76mm가 되었을 때, 11cm의 길이로 자른 후에 외경이 8mm, 내경이 6.5mm 인, 은 파이프에 stacking하였다. 모두 19심이 채워지며 이것을 인발을 시작하기 전에 tube furnace를 이용하여 650 °C에서 30min간 열처리를 하였다.

3) 외경을 8.5mm에서 6mm까지 인발시에는 1m/min의 속도를 대략 1/3정도로 낮추어 하였으며, 그 후 2.06mm의 외경까지 대략 1m/min 정도의 속도를 유지하였다. 이 길이까지 인발 후, 650 °C에서 30min간 열처리를 한 후 다시 1mm의 외경으로 인발하였다.

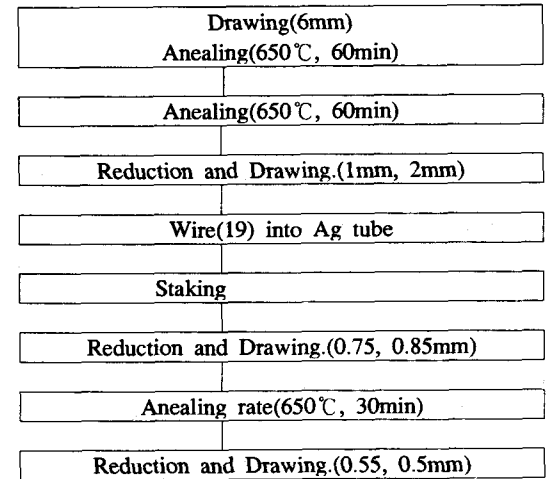


그림 2. 다심 선재의 Drawing 과정  
Fig. 2 Drawing process of multifilament

BPSCCO2223의 결정립은 판상형 구조를 갖기 때문에 기계적인 압연공정으로 입자가 압연면에 평행하게 배열하는 집합조직을 갖으며, 열처리 후에도 이러한 집합조직은 유지, 강화된다. 압연공정은 선재의 결합 (Sausage Effect)를 크게 야기시킬 수 있다. 압연율이 크게 되면 조직의 배열에 결합이 나타날 확률이 크게 되며, 압연율이 너무 작게 되면 압연공정에서 장시간을 소요하게 되므로 적절한 압연율을 10%이하의 압연율 (rolling reduction ratio)이 최적이라는 연구 결과들

에 의해서 10%로 압연하였다. 압연 과정은 그림 3과 같은 형식으로 압연한다.

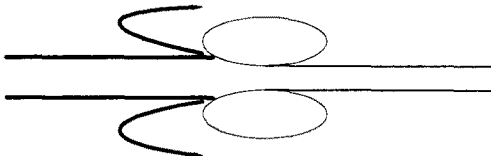


그림 3. 압연 공정  
Fig. 3 Process of rolling

### 2-2-5 열처리 (Heat Treatment)

기계적인 공정이 끝난 고온초전도 테이프는 최종 열처리 과정을 거침으로서 초전도성을 띠게 된다. 열처리 온도 및 시간은 현재까지도 최적화가 되어있지 않고 있다. 또 하나의 문제점으로는 전기로마다 온도 구배가 어느 정도는 나타나기 때문에, 위치별로 다른 특성을 보여지게 된다. 초전도 코일을 만들기 위해서는 단심과 다심 선재는 일반적으로 다른 열처리 공정을 거치게 된다. 단심 선재는 열처리 전에 원하는 코일형상을 만들고 나서 열처리를 하는 wind and react법을 사용하므로써, 그 형상과 크기에 큰 제한이 있다. 앞서 언급하였듯이 단심 선재는 굽힘 가공성이 다심에 비해 매우 떨어지기 때문이다. 다심 선재의 경우 react and wind법을 사용함으로써 코일의 형상과 크기에 크게 구애를 받지 않게 된다. 다심 선재의 열처리 조건 및 순서는 그림 4와 같다.

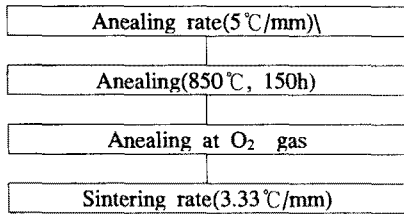


그림4. 다심 선재의 열처리 과정  
Fig. 4 Heat treatment process of multifilament

### 3. 실험 결과

Bi계 초전도 선재 제작시 손실 감소할 수 있는 시뮬레이션과 실제 제작 후 전압과 손실을 측정하였다.

#### 3.1 시뮬레이션에 의한 손실 분석

직류선재에 교류전류를 인가하여 발생하는 손실을 시뮬레이션한 것이다. AC 손실 인자인 점적율, 인가된 자장 세기, 도체의 반경, 트위스트 피치와 주파수의 변환에 의한 영향을 나타내었다. 시뮬레이션을 London-Bean 모델에서 가정하고 교류 자계에서 유기되는 전류밀도는 일정한  $J_c$ 가 흐른다고 가정하고, 교류 자계에 의해 유기되는 내부전계를 맥스웰 방정식에 의해, 구한 후 히스테리시스 손실을 구한 시뮬레이션은 AC 손실의 중요한 특성인 필라멘트의 갯수, 선재 직경, 점적율, 트위스트 Pitch 길이, 내부 필라멘트 전류의 효율적인 매트릭스 저항 등에서 선재 직경이 크고, 점적율이 크고, 필라멘트 수가 많을 수록 히스테리시스가 큰 것으로 나타났다. 또한, 트위스트 피치 길이가 길고, 내부 필라멘트 전류의 효율적인 매트릭스 저항이 작으면 작을 수록 Coupling 손실이 큰 것으로 나타나고, 자계의 침투 깊이, 트위스트 피치가 길고 주파수가 클수록 와전류에 의한 손실이 큰 것으로 나타났다. 그림5는 자기장을 0.5~5T인가할 경우 손실을 시뮬레

이션하였는데 3.5T일 때 0.6 J/m<sup>3</sup>으로 나타났고, 그림6은 침투 깊이에 의한 손실과 점적율에 대한 관계 초전도체 선재에 인가 전압에 대한 상관관계를 나타내고 그림 7은 인가전류에 대한 손실을 나타냈다.

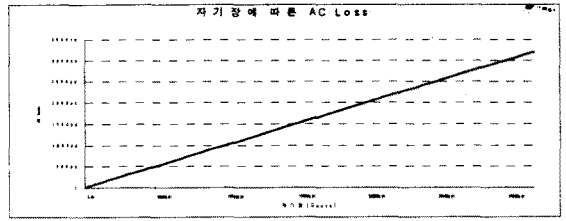


그림5. 시뮬레이션에 의한 자기장에 의한 손  
Fig. 5 Loss by simulation of magnetic filed

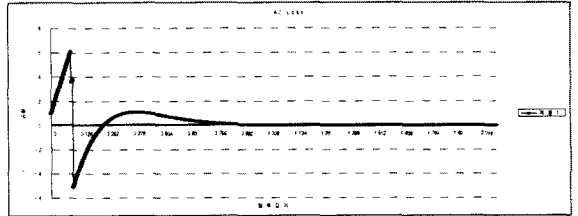


그림6. 시뮬레이션에 의한 침투 깊이에 따른 손실  
Fig. 6 Loss by simulation of permeated depth

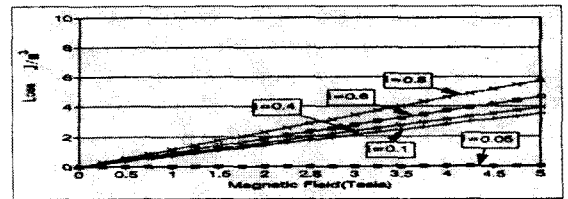


그림 7. 시뮬레이션에 의한 인가 전류에 따른 손실  
Fig. 7 Loss by simulation of applied current

### 3-2 선재 제작 후 특성 분석

AC손실은 액체 질소 하에서 전류인가 시 저항이 발생하는 값으로 측정, 계산하였다. 전류인가 시 시편에 흐르는 시편 양단에 전압을 측정하여 두 물리량을 곱한 것으로 손실을 측정하는 계산하고 초전도 선에 저항성분이 없다면 측정된 전압과 전류는 90° 위상 차를 가지게되므로 전압 전류의 곱을 한 주기 동안에 대해 적분한 값은 영이 되고, 저항성분이 있다면 적분한 값이 영이 아닌 어떤 값이 초전도에서 발생하는 손실로써 분석하였다.

#### 3-2-1 단심과 다심 선재의 전압과 손실 측정

그래프8에서 계열 1은 다심(19) 테이프이고 계열2는 단심 테이프 선재의 특성을 나타낸다. 그림 11에서 본바와 같이 액체 질소하에서 전류를 같은 크기로 인가할 경우 큰 차이의 전압차이가 나타났다. 단심은 1A의 전류를 인가하여도 높은 전압이 뻗지만 다심(19)은 1A에서는 거의 전압이 나타나지 않고 9.1A에서 같은 전압이 나타났다.

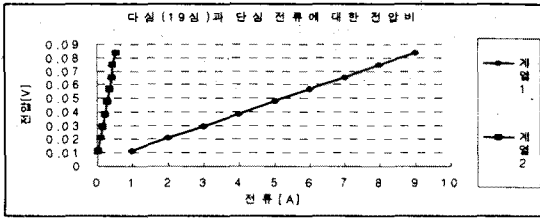


그림8. Bi계 다심(19심)과 단심 전류에 대한 전압비(LN2)  
Fig.8 Voltage rate to current of Bi-system monofilament and multifilament (LN2)

또한 손실은 그림 9에서 보는바와 같이 계열1은 다심(19심), 계열2는 단심으로써 다심에서 손실이 약 9.1 배로 적은 것으로 나타났다.

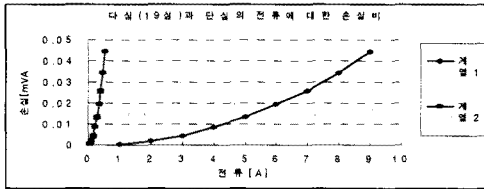


그림9. Bi계 다심(19심)과 단심 전류에 대한 손실비(LN2)  
Fig. 9 Loss rate to current of Bi-system monofilament and multifilament (LN2)

### 3-2-2 Bi계 선재의 산화에 따른 특성 비교

단심 테이프를 열처리 후 즉시 전류에 대한 전압 비와 손실 비는 1.89A를 인가할 경우  $0.185 \mu V$ 가 나타났고, 손실은  $3.50028 \mu VA$ 가 되었다. Sintering 후 즉시 측정된 초전도 테이프의 전류와 전압관계는 그림 10에서 계열 1과 2와 같으며 1.65A일 때 Offset되고, 열처리 한 후 48시간 공기중에 방치한 샘플의 경우 전류와 전압비가 보는 바와 같이 1.02A에서 전압이 검출되었다.

또한, 전류 1.46A에서  $0.898A \mu V$ 로써 초전도가 응용 가능하고 이때 손실은  $1.31108 \mu VA$ 로 나타났다. 이때 측정된 값은 전류 1.58 A에서 즉시 측정된 경우는  $0.252 \mu V$ 이고  $1.457 \mu V$ 로 나타났다. 또한 손실은 그림 11에서 계열 1은 열처리 즉시 분석한 손실이고 계열 2는 48h 후 측정된 결과로써 전류 1.5에서 손실은  $0.39816 \mu VA$ 와  $2.30206 \mu VA$ 로 나타났다.

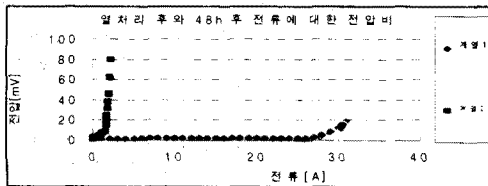


그림 10. Bi계 단심 전류에 대한 전압비 (계열1:즉시, 계열2:48h후)  
Fig. 10 Voltage rate to current of Bi-system monofilament (sys.1:immediately, sys.2 after 48hr.)

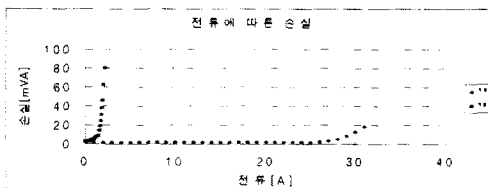


그림 11. Bi계 단심 전류에 대한 손실비(계열1:즉시, 계열2:48h후)

Fig.11 Loss rate to current of Bi-system monofilament (sys.1:immediately, sys.2 after 48hr.)

### 4. 결 론

직경이 크고, 점적율이 크고, 필라멘트 수가 많을수록 히스테리시스가 큰 것으로 나타났다. 또한, 트위스트 피치 길이가 길고, 내부 필라멘트 전류의 효율적인 매트릭스 저항이 작으면 작을 수록 Coupling 손실이 큰 것으로 나타나고, 자계의 침투 깊이가, 트위스트 피치가 길고 주과수가 클수록 와전류에 의한 손실이 큰 것으로 나타났다. 제작된 Ag-sheath Bi-2223 고온 초전도 선재는 단심과 다심 필라멘트의 손실을 최소화할 수 있는 설계 조건에 근거하여 Bi계 초전도체 다심(19)과 다심 테이프를 제작하여 전기저항 측정 방법에 의하여 손실을 측정된 결과

- 1) 단위면적 당 손실은 다심보다 단심이 10.2배 작고
- 2) 단위 면적 당 받는 같은 전류에 대해 전압도 다심이 단심보다 약 10.2배로 작았다.
- 또한 열처리 조건은 4가지 샘플은 같았지만 열처리 후 공기 중에서 보관 한 후 초전도 특성을 분석한 결과이다.
- 3) 열처리 후 전류에 대한 전압 비는 48h 후의 샘플보다 9.1배다 작고
- 4) 열처리 후 전류에 대한 자체에서 발생하는 손실 비는 48h 공기 중에 있던 샘플보다 9.1배의 손실이 적었다.

상기와 같은 결과에 의해서 동안 Bi계 초전도체는 제작 후 특성 변화에 대한 실험 결과를 근거로 Bi계 응용에 적용코져 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1]A.C. Rose-Lnnes and E. H. Rhoderick, Introduction to Superconductivity, Pergamon, 2nd ed, 1978
- [2]Taekuk Ko and O.K. Mawardi, "Parametric Representation of a Superconducting High-Current Generator", IEEE Trans. on Magetics, Vol. 25, No. 5, PP. 4346-4349, S테. 1989
- [3] W.J.Carr, Jr. AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors, Gordon and Breach science, 1983
- [4]A. M. Campbell, "A general treatment of losses in multifilamentary superconductors" Cryogenics Jan., p3, 1982