

## 적층형 Bi-2223 고온초전도 선재 제작에 관한 연구

### A study on fabrication of stacking type Bi-2223 HTS tapes

임성우\*, 두호익\*, 한병성\*

(Seong-Woo Yim, Ho-Ik Du, Byoung-Sung Han)

#### Abstract

The critical characteristics of Bi-2223 HTS tapes made by PIT method are influenced by the heat treatment and the mechanical processing. In this study, firstly, we investigated the influence of rolling reduction rate in mechanical process for improving Jc of HTS tapes. As a result, the optimized rolling reduction rate that we obtained was 10%-50% and 30%-30%(1st-2nd).

And then, we fabricated the stacking type HTS tapes that made of the multi-filamentary tapes with various length (3,5,10cm) and with various number of stacking (1,5,10 layer). Measuring the critical current and observing the structure of grain, we concluded that the stacking type tapes will be able to operate more stably by adding the number of stacking tapes. And we could expect that by minimizing the gap between Ag-sheath of tapes, mechanical strength of stacking HTS tapes is enhanced and current in tapes will flow more stably.

**Key Words(중요 용어)** : Bi-2223 HTS tape (Bi-2223 고온초전도 선재), rolling reduction rate (롤링 감소율), stacking type HTS tape(적층형 고온초전도 선재)

#### 1. 서론

PIT법으로 제작된 Bi-2223계 초전도 선재는 전류 도입선, 초전도 케이블, 초전도 마그넷 등의 응용에 적합한 임계 온도와 가공성을 지님으로써 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 초전도 전류 도입선의 경우, 선재를 적층 제작하여 통전전류의 증가를 도모하는데, 보다 안정적으로 전류를 통전시키기 위해서는 선재 자체의 기계적 강도 및 임계전류 향상 그리고 전류 도입선의 설계 시 도입선의 단면적과 길이가 중요한 파라미터로 작용하

로 이에 관한 적합한 연구가 매우 중요하다 할 수 있다.<sup>3,4)</sup>

초전도 선재의 임계특성은 주로 선재 가공 시 초전도 시료, 열처리 공정과<sup>5,6)</sup> 기계적 가공을 제어에 의해<sup>7,8)</sup> 많은 영향을 받는다. 특히 기계적 가공은 스웨이징, 압출, 인발, 롤링 등의 공정으로 이루어지는데 특히 이번 연구에서는 각 열처리 사이의 롤링 시 감소율이 초전도 선재의 코어의 밀도에 미치는 영향과 임계전류특성 그리고 각 감소율에 따른 소세징 현상의 변화를 조사하였다.

또한 이로부터 얻은 결과를 이용하여 기계적 강도를 높이고 임계전류의 향상을 위해 다심선재를 제작하였으며 이를 적층하여 임계특성을 조사하고자 하였다.

전류 도입선의 단면적과 길이는 설계 시 중요한 파라미터로 작용한다. 이 파라미터의 특성을 알아보기 위해 적층 수와 길이가 다른 적층선재를 제작, 임계

\* : 전북대학교 전기공학과

(전주시 덕진동 1가 664-14, Fax : 0652-277-0918,

E-mail : yim@electric.chonbuk.ac.kr)

1999년 11월 17일 접수, 2000년 8월 9일 심사완료

특성을 조사하였다. 또 이 적층형 선재의 단면과 조직을 관찰하여 장척선재에 나타나는 결점을 보완하고자 하였으며, 이 결과는 초전도 케이블이나 전류 도입선 설계시 고려사항으로 활용될 것이다.

## 2. 실험

### 2.1 단심선재 제작

PIT(Powder-In-Tube)법을 이용하여 선재를 제작하였으며 사용된 분말은 순도 99.999%의 고순도  $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  분말 (SUPERCONDUCTIVE Components Inc.)을 사용하였다. 외경 10mm, 내경 8mm의 순은 튜브에 균일한 밀도로 시료를 충전한 후 스웨징 작업을 거쳐 15%의 단면적 감소율로 외경 1.24mm까지 인발하였다.

인발속도는 소세징 현상을 최소로 하기 위해 은튜브의 지름 4.8mm까지는 350mm/min의 저속으로, 그 이후 최종 인발까지는 620mm/min의 속도로 인발하였다. 이렇게 인발된 지름 1.24mm의 와이어 형태의 선재를 다시 두께 0.3mm까지 각각 감소율 10%, 30%, 50%로 1차 롤링하였으며, 각각의 조건으로 제작된 시편을 843 °C에서 100시간 동안 1차 열처리하였다. 이렇게 1차 열처리가 끝난 각각의 시편을 다시 10%, 20%, 30%, 40%, 50%의 감소율로 최종 두께 0.14mm까지 동일한 두께로 2차 롤링을 행하였으며 이 시편들을 다시 843 °C에서 100시간 동안 2차 열처리를 행하였다.

모든 공정이 끝난 시편은 4단자법을 이용하여 임계 전류 밀도를 측정하였으며, 광학현미경을 사용하여 단면과 조직을 관찰하였다.

### 2.2 다심선재 제작

위와 같은 조건으로 제작된 최종 인발 두께 1.54mm인 와이어 형태의 선재를 30cm 썩 자른 후 19가닥의 선재를 외경 10mm 내경 8mm의 은봉에 패키징한 후 이를 인발기를 이용하여 역시 단심 선재 제작시와 같은 조건으로 외경 1.38mm 까지 인발하였다. 이렇게 만들어진 와이어 형태의 다심선재를 30%의 감소율로 롤링하여 두께 0.3mm의 테입 형태로 1차 롤링하였으며 장척의 선재를 제작하기 위해 원형의 알루미늄 튜브에 선재를 감아 838 °C 온도로 1차 열처리하였다. 유지 시간 100 시간의 1차 열처리가 끝난 시편을 다시 감소율 30%로 2차 롤링을

행하였다. 최종 두께 0.2mm의 초전도 선재를 적층한 후 은선으로 감아(simple stacking) 제작된 시편을 100 시간 동안 1차 열처리와 같은 온도인 838 °C에서 2차 열처리하여 시편을 완성하였다.

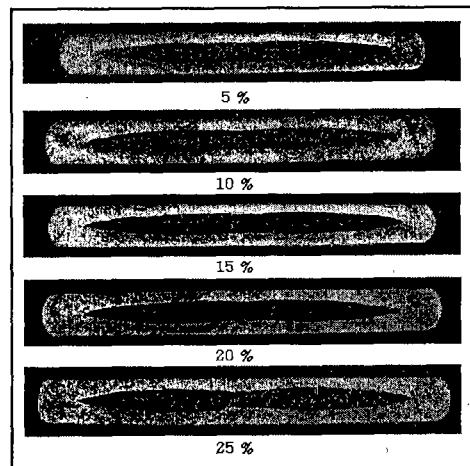
### 2.3 적층선재 제작

적층형 다심 선재는 다음과 같은 조건으로 제작 실험하였다. 첫째, 1차 열처리가 끝난 선재를 15cm로 절단한 후 단면적의 변화에 따른 특성을 알아보기 위하여 각각 1층, 5층, 10층으로 적층하였다. 두번째 조건은 길이에 따른 변화를 알아보기 위해 10층으로 적층한 선재를 각각 3cm, 5cm, 10cm, 15cm로 길이로 제작하였다. 이와 같은 조건으로 제작된 선재를 다심선재 제작 시 1차 열처리와 조건으로 2차 열처리하였으며 이에 대한 특성을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험 결과

1차 롤링(감소율:5%,10%,15%,20%,25%)과 2차 롤링 공정(10%) 후 각각의 단면 사진을 그림 1에 나타냈다. 1차 롤링 후에 감소율에 따라 코어의 종단면에 각기 다른 변화가 있음을 알 수 있다. 그림 1.(a)에서 감소율이 높아질수록 더욱 큰 압력이 코어 중심부에 가해져 코어 단면의 형상이 변화하고 있다. 그러나 2차 롤링 후 코어 중심부의 밀도는 임계점에 다다르게 되며 결국 가해진 압력은 코어 양 옆으로 전달되어 각 선재의 코어 단면 형상에 차이가 줄었음을 그림 1.(b)로부터 확인할 수 있다.



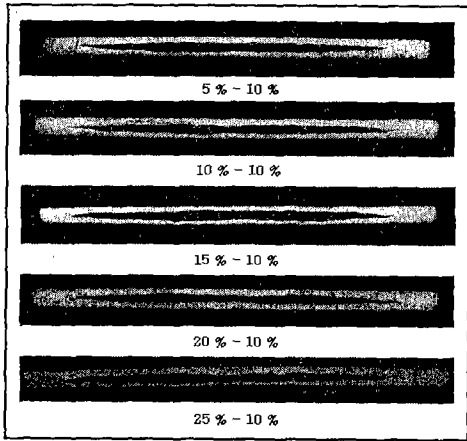


그림 1. a) 1차 롤링 감소율에 따른 선재의 종단면  
 b) 1차 롤링 후 10%의 2차 롤링 감소율로 가공한 선재의 종단면

Fig. 1 a) Transverse cross section of Bi-2223 tapes with different 1st rolling reduction rate  
 b) Transverse cross section of Bi-2223 tapes with 2nd rolling of 10% reduction rate after 1st rolling

코어 밀도와 임계전류밀도의 상관관계를 알아보기 위하여 롤링 감소율에 따른 임계전류밀도의 변화를 관찰하였다.(그림 2)

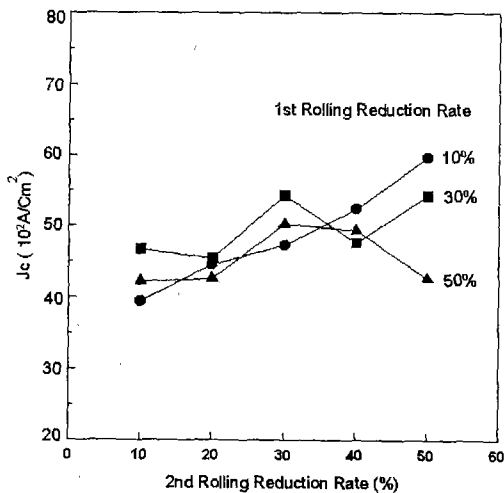


그림 2. 2차 롤링 감소율에 따른 선재의 임계전류 밀도 변화(1차 롤링 감소율:10%, 20%, 30%)

Fig. 2 Variation of critical current density with different 2nd rolling reduction rate

1차 롤링 감소율이 10%일 때 2차 롤링 감소율이 증가함에 따라 임계전류밀도가 점점 증가함을 알 수 있다. 이것은 그림 1의 결과에서 관찰된 바와 같이 선재 전체에 롤링에 의한 응력이 고르게 전달되어 조직의 밀도가 선재전체에 고르게 분포된 결과로 볼 수 있다. 그러나 1차 롤링 30% 감소율의 경우, 임계전류밀도는 완만한 증가를 보이며 감소율이 50%일 때는 2차 롤링 감소율이 증가함에 따라 오히려 임계전류밀도가 감소함을 관찰할 수 있었다.

이로부터 선재 내의 코어의 밀도가 1차 롤링 감소율이 적을 때는 주로 2차 롤링 감소율에 의존하지만 반대로 1차 롤링 감소율이 클 경우, 2차 롤링 감소율에 의한 의존도는 감소한다고 판단할 수 있다.

또한 위의 결과로부터 선재 제작 공정에서 1차 롤링 감소율은 될수록 작게 하고 2차 롤링 감소율은 크게 할 때 높은 임계전류밀도를 기대할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

그림 3은 은 피복재 내의 소세징 효과를 관찰하기 위한 그림이다. 소세징 효과는 실제로 선재의 임계전류밀도에 적지 않은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

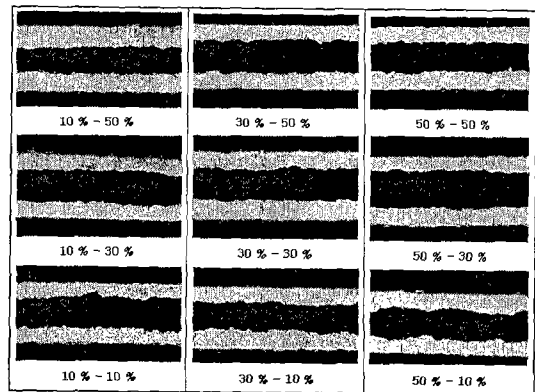


그림 3. 롤링 감소율(1차-2차)에 따른 선재 횡단면  
 Fig 3. Longitudinal cross section of Bi-2223 tapes with different rolling reduction rate

1차 롤링 시 10%의 감소율일 때는 2차 롤링 감소율이 높을수록 오히려 소세징 현상이 감소하고 있으며, 1차 롤링 감소율이 30%일 때는 2차 롤링 감소율에 관계없이 비슷한 결과를 보였다.

그러나 1차 롤링 감소율이 50%일 때 역시 2차 감소율이 적을 때보다는 큰 경우 소세징 효과가 적게 보이며 이것은 그림 2의 임계전류밀도의 변화와도 일치하는 결과이다

그림 4는 위의 결과로부터 얻어진 조건(30%-30%, 843 °C-100h)으로 제작된 단심 선재를 이용해 제작된 다심선재의 임계전류를 나타낸다.

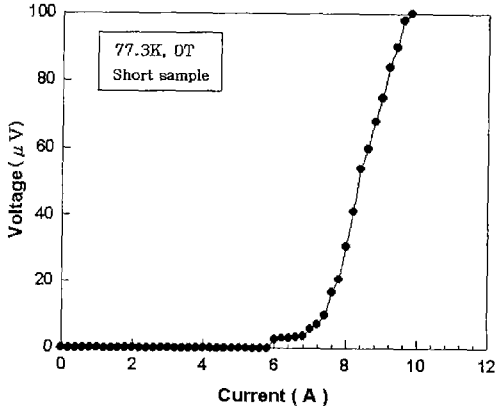


그림 4. 제작된 다심선재의 임계전류 (3cm, 30%-30%, 838 °C-100h)  
Fig. 4 I-V curve of multi-filamentary tapes

그림 5는 적층형 선재의 길이에 따른 임계전류의 변화를 나타내는 그래프이다.

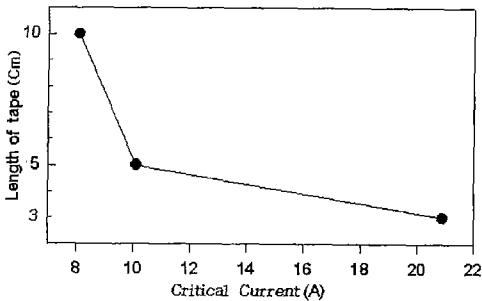


그림 5. 길이에 따른 임계전류 변화 (적층수:5층)  
Fig 5. Variation of critical current of stacking tapes with different length

그림으로부터 선재가 장선화됨에 따라 급격히 임계전류가 떨어짐을 알 수 있다. 이것은 선재가 장선화됨에 따라 내부에 존재하는 소세징 현상 등의 결합이 증가함에 따라 나타나는 결과로 사료된다.

그림 6은 선재의 적층수에 따른 임계전류의 변화를 나타낸다. 일정한 길이의 선재를 적층수를 증가시키기에 따라 거의 선형적으로 임계전류가 증가함을 알 수 있다. 결과적으로 선재가 장선화 되면서 임계특성의 저하가 선재의 적층을 통해 보상되고 있다는 것을 알 수 있다.

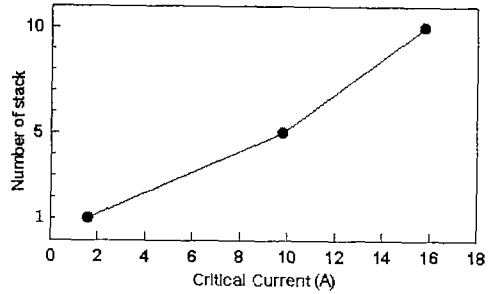


그림 6. 적층수에 따른 임계전류 변화 (길이:10cm)  
Fig. 6 Variation of critical current with 1, 5, 10 layered tapes (Length:10cm)

이러한 결과를 추론하기 위해 3층으로 적층한 선재의 개략도(그림 7)를 통해 전류의 분포를 분석하고자 하였다.

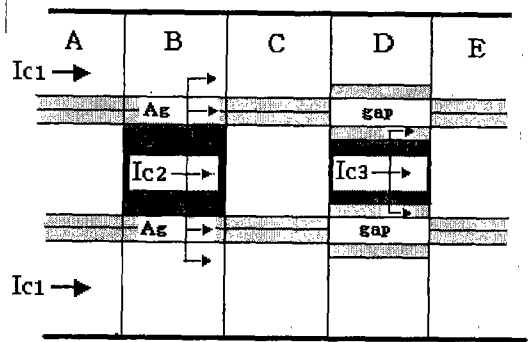


그림 7. 적층 선재의 전류 흐름도  
Fig. 7 Schematic diagram of current flow in the stacked tapes

각각의 선재가 일정한 임계전류  $I_{c1}$ 을 갖는다고 가정할 때 A영역에는 모두 똑같은 전류  $I_{c1}$ 이 흐른다. 한편 장선화 선재의 경우, 소세징과 같은 선재의 결합에 의해 임계전류 보다 작은 임계값( $I_{c2}$ )를 갖는 B영역이 존재한다면 인가된 전류가  $I_{c2}$  보다 크게 되면 이 부분의 초전도성이 파괴되어 전류는 피복재를 통하여 흐르게 된다.

그러나 피복재인 은으로 흐르는 전류는 다시 저항이 없는 이웃한 선재 내의 초전도체로 흐르게 될 것이다. 또한 이렇게 전류가 분배됨으로써 B영역은  $I_{c2}$  이하의 전류를 흐를 수 있게 됨으로써 B영역의 어두운 부분은 초전도성을 회복하게 된다. 따라서 적층된 선재는  $I_{c1}$ 과  $I_{c2}$  사이의 전류에서 퀀치가 일어났음에도 불구하고 미약한 저항만이 존재하는 일

정한 중간상태를 유지할 것이며, 적층된 선재 전체에  $I_{c1}$  이상의 전류가 인가될 때까지 이 상태를 유지할 것임을 알 수 있다. 결과적으로  $I_{c1}$ 와  $I_{c2}$ 의 차이만큼의 전류는 인접한 선재로 분배되어 흐르게 됨으로써 적층된 선재에 고르게 분포되는 것이 가능하다. 결론적으로, 보다 많은 수의 선재를 적층함으로써 결합이 존재하는 부분에 의해 초과된 전류를 인접 선재에 분할하여 완전한 켜치가 일어나지 않으며, 적층된 선재 전체가 임계전류 이상의 전류에 의해 초전도성이 완전히 파괴될 때까지 안정적으로 초전도 상태를 유지될 수 있을 것이다.

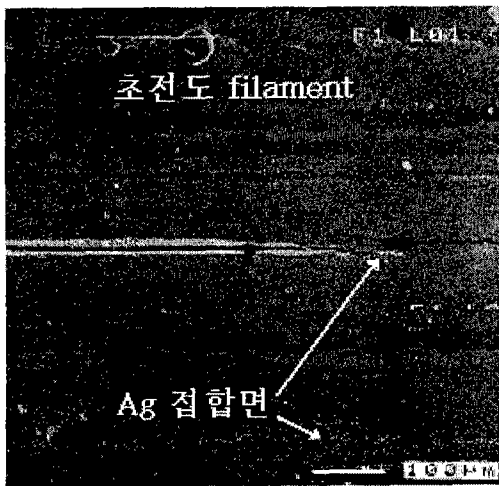


그림 8. 제작된 다심 적층선재의 단면  
Fig. 8 Longitudinal cross section of stacking tape fabricated

그러나 은 피복재 사이에 틈(gap)이 존재할 경우(D 영역)는 다른 현상이 발생한다.  $I_{c2}$  이상의 전류가 인가 됐을 때 전류는 역시 은 피복재로 흐르게 되지만 피복재 이외에 전류가 흐를 도체가 존재하지 않기 때문에 이 부분에서 선재는 B영역과 달리 저항이 발생하며 이에 의해 발생한 열적 거동은 결과적으로 전체 적층된 선재를 켜치에 이르게 할 수 있다.

따라서 선재의 적층 수를 늘림으로써 쉽게 초전도성이 파괴되는 것을 방지하여 안정적으로 통전시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있으며, 선재 적층 및 열처리 과정에서 피복재 사이의 틈(gap)을 최대한 줄여야만 기기의 안정성을 높이고 금속재인 은에 의한 기계적 강도 또한 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8과 9으로부터 이러한 추론을 확인할 수 있다. 그림 8은 적층하여 열처리한 선재의 횡단면 일

부분을 보여주고 있다. 그림 아랫부분의 도체 사이의 접합면에는 틈이 존재하지 않지만 중간과 윗부분의 접합면에는 틈이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 경우, 그림 7과 같은 이유로 선재의 임계특성에 있어 치명적인 결점으로 작용할 것임을 예상할 수 있다. 그림 9는 15cm의 선재를 10층으로 적층한 선재의 임계전류특성을 나타낸 것이다.

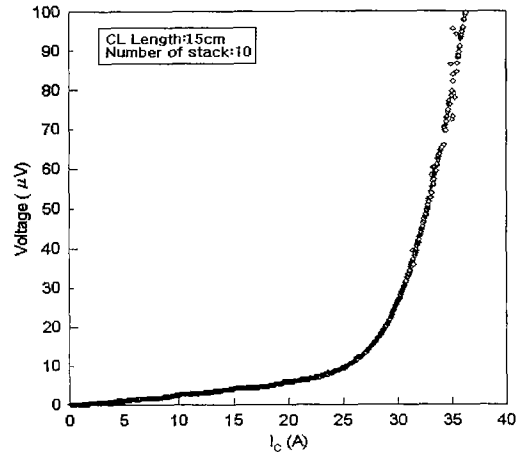


그림 9. 적층된 선재의 임계전류특성  
(길이 15cm, 적층 수 10층)  
Fig. 9 Critical temperature density of stacking tape (Length:15cm, Number of stack:10)

그림으로부터 임계전류( $1\mu V$ 이하)는 5A에 불과하지만 약 25A까지  $10\mu V$  이하를 유지함을 관찰할 수 있다. 즉, 국부적으로 초전도성이 깨짐으로써 약간의 저항이 존재하기는 하나 그림 7과 같은 이유로 전류는 안정화계를 통해 분배되며, 장선화에 의한 선재의 결함을 상당부분 보완할 수 있을 것으로 판단할 수 있다. 특히, 전류도입선이나 케이블과 같은 경우 대 전류 통전 시 저항 발생을 최소화하면서 전류를 안정적으로 통전시킬 수 있다면 액체헬륨의 소비를 줄이고, 안정적으로 전류를 통전시킬 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

초전도 전류도입선 또는 케이블의 구성요소로서 초전도 선재를 이용하기 위해 적층형 선재를 제작하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

선재의 기계적 가공 시 열처리 사이의 롤링 감소율은 선재의 임계전류밀도에 많은 영향을 미침을 알 수 있었다.

1차 롤링 감소율이 10%로 가장 작을 때는 2차 롤링 감소율이 클수록 소세징 현상이 줄어들었으며 이에 따라 임계전류밀도는 증가하였다. 결과적으로, 가장 높은 임계전류밀도를 보인 것은 1차와 2차 롤링 감소율이 각각 10%~50%, 30%~30%로 나타났다.

실제 응용을 위한 감소율은 제작시간, 경제성 등을 고려할 때 30%~30%가 적당한 값이라고 할 수 있겠으나, 최대의 임계전류를 위해서는 10~50%의 감소율이 적합하다고 판단된다. 그러나 시료의 충진을 또는 적합한 피복재 선택과 같은 재료 개선에 의해서도 입자의 고른 재배열은 가능할 수 있을 것이다.

일반적으로 고온초전도 선재를 초전도 기기에 응용할 때 적층 형태로 제작하여 통전 능력을 높이는 방식을 채택한다. 그러나 금속재인 은 피복재와 세라믹인 초전도체 사이의 열팽창률 차이에 의해 변수 확립이 어렵고 적층 선재의 길이와 적층 수 즉, 단면적에 따라 열전달율이 달라진다. 따라서 초전도 기기를 설계할 때는 길이와 단면적의 상호관계를 충분히 고려하여야 한다.

이번 연구 결과를 통해 적층 선재의 길이의 증가에 따라 존재하는 임계전류 감소에 대처하기 위해서는 선재의 적층 수를 최대로 늘려 제작하여야 한다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 선재 적층 시 그리고 후열처리 시 선재 사이의 틈을 최대한 줄임으로써 전류 인가 시 도입선의 안정성을 기대할 수 있으며, 안정화재 역할을 하는 은에 의한 기계적 강도 또한 높일 수 있을 것이라는 결론을 얻을 수 있었다.

그러나 무엇보다도 양질의 선재를 얻기 위해서는 기본적으로 적절한 열처리 온도와 기계적 공정의 변수를 확립하여 정밀한 제어에 의해 제작하는 것이 가장 중요하다 할 수 있을 것이다.

**감사의 글**

본 연구는 1999~2000년도 기초전력공학공동연구소의 연구비 지원(관리번호:99-g-01)을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

**참 고 문 헌**

1. IEEE, SPECTRUM, pp. 31~35, July 1999.
2. Yukikazu Iwasa, Case studies in superconducting Magnets Design and Operational Issues, 125-141
3. T. Sasaoka, J. Sato, K. Fukushima, M. Okada, M. Endo, Y. Yaegashi and M. Nagano, "Design

- and testing of current lead made from Ag-Au sheathed Bi-2223 Superconducting wire", Cyogenics, Vol. 37, No. 8, pp. 409~415, 1997.
4. S. Y. Seol, J. R. Hull, M. C. Chyu, "Optimization of high temperature superconductor current lead", IEEE Trans. On App. Supercond., Vol. 5, No. 2, June 1995.
5. U. Endo, S. Koyama and T. Kawai, "Preparation of the High-Tc Phase of BiSrCaCuO Superconductor", Japanese Journal of App. Phys., Vol. 27, No. 8, pp. L1476~L1479, August 1988.
6. K. Osamura, S. Onaka and Y. Katsumura, "Influence of Oxygen Partial Pressure on Critical Current Density of Ag/Bi-2223 Tapes", ICEC16/ICMC Proceedings, pp. 1357~1360
7. Z. Han . and Freltoft T., Appl. Supercond., 2, pp. 201, 1994.
8. Z. Han, D. Skov-Hansen and T. Freltoft, "The mechanical deformation of superconducting BiSrCaCuO/Ag compositers", Supercond. Sci. Technol., Vol. 10, pp. 371~387, 1997.