

KAERI/RR-3047/2009

고효율 초전도 전류인입선용  
도체 재료 개발  
(자체연구개발사업 최종보고서)

Development of conductor material  
for high efficient superconducting current lead

*KAERI*

2010. 1.

한국원자력연구원

사 업 명	자체연구개발사업		
과 제 명	(국문) 고효율 초전도 전류인입선용 도체 재료 개발		
	(영문) Development of conductor material for high efficient superconducting current lead		
연구책임자	(소속) 중성자과학연구부 (성명) 전 병 혁		
총 연구비 (천원)	55,000	총 연구기간	2008.01.01. ~ 2009.12.31. (2년)
투입인력 (M.Y)	0.45	당해연도 연구기간	2009.01.01. ~ 2009.12.31. (1년)

# 제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 자체연구개발사업 “고효율 초전도 전류인입선용 도체 재료 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2010. 1.

수행책임자 : 전 병 혁

연구원 : 김찬중, 최정숙,  
윤재성, 마흐무드 아시프,  
이지혜

KAERI

# 요 약 문

## I. 제 목

고효율 초전도 전류인입선용 도체 재료 개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

초전도를 이용한 전력응용 기술이 가속화됨에 따라 전력관련 기기에 전력을 공급하는 고효율 초전도 전류인입선(current lead)의 개발이 필요하다. 특히 액체 헬륨이나 액체질소와 같은 냉매를 사용하는 기기의 운영 효율을 높이기 위해 열방출이 적고 통전용량이 높은 벌크형 초전도체 전류인입선이 절대적으로 요구된다. 기존의 금속재질의 전류 공급부를 초전도 벌크로 대체할 시 기기운영 효율 증대 및 전류 공급부의 소형화 장점이 있다. 현재까지 BSCCO의 연구는 주로 초전도 선재 제조를 목적으로 수행되었으며 벌크 튜브 형태의 초전도 전류인입선에 대한 국내 연구는 거의 전무하다. 따라서 초전도 전류인입선의 개발 성공시, 초전도 전력 기기용 전류선의 국산화 신기술 확보를 통하여 수입 대체시 대외 협상력 강화로 인한 가격 경쟁력을 유도할 수 있다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

1차년도: BSCCO ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ , BSCCO-2212) 도체 제조를 위한 공정 기초연구 ( $J_c=500 \text{ A/cm}^2$  at 65K)

- BSCCO 벌크 제조기술 기초연구
- BSCCO 초전도 용융/주조 성형연구
- 원심용융성형장비 (한전전력연구원 보유) 부분 개조
- 공정 기초실험 및 미세조직 연구
- 후열처리 조건 변화 및 전기적 특성 평가 기술 구축

2차년도: BSCCO 초전도 전류리드선용 도체 제조 ( $J_c=1,000 \text{ A/cm}^2$  at 65 K)

- 길이 10 또는 15 cm, 직경 3 cm 인 BSCCO 튜브 제조기술

- BSCCO 초전도 용융공정 확립
- 초전도 벌크체의 몰드로부터의 이형기술
- 미세조직에 따른 초전도 특성 분석 및 임계전류특성 측정
- 부분용융열처리 공정에 의한 임계전류특성 향상

#### IV. 연구개발 결과

본 연구에서는 용융 원심성형 장치를 이용하여 초전도 전류인입선용 BSCCO 튜브를 제조하였다. 1200℃의 온도에서 BSCCO 초전도 분말 용융시, 용탕의 충분한 유동성을 보여 튜브 성형에 있어 균일한 조직을 형성하였다. ZrO<sub>2</sub> 또는 BSCCO 분말 이형체가 사용된 금속 몰드를 550℃에서 2시간 예열하고 2520 rpm으로 몰드를 회전시켰을 때 균질한 형상을 갖는 30 Φ×150 h ×4 t (mm)의 BSCCO 튜브가 제조되었다. 제조된 BSCCO 튜브에 대하여 840℃ 860℃ 880℃의 부분 용융 공정 및 810℃의 산소 분위기 열처리는 BSCCO 2212의 상 형성에 있어 충분한 열처리 조건임을 확인하였으며 각 온도별 열처리 시편에서 BSCCO 2212 결정립을 볼 수 있었다. 임계특성 측정 결과 77 K에서 각각 492 A/cm<sup>2</sup>, 430 A/cm<sup>2</sup>, 398 A/cm<sup>2</sup> (65 K로 환산시 각각 1,722, 1,505, 1,393 A/cm<sup>2</sup>)으로 840℃의 부분 용융 열처리 온도에서 가장 높은 임계전류 값을 나타내었다. 이는 840℃의 부분용융 열처리된 시편에서 판상조직의 우수한 방향성과 큰 결정립 크기에 기인한다고 판단된다. 본 실험으로부터 840℃의 부분용융 열처리가 최적의 부분용융 온도로 사료된다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획

정부주도 중형과제의 도출을 위한 선행 연구로 많은 노하우와 경험을 축적하였다. 향후 도출된 과제가 성공시 초전도 전류인입선의 국산화 신기술 확보에 기대할 수 있다. 소재 국산화시 소재 개발에 대한 인식을 제고할 수 있으며 벌크 초전도체의 시스템 연구를 촉진시키는 효과를 가져올 것으로 판단된다. 초전도 전류리드선 개발에서 확보된 기술의 상용화 추진이 가능하며 유사응용기기인 핵융합로내 부품, 초전도 한류기 소자, 자기차폐기, 벌크 자석용 BSCCO 소재 개발에도 활용될 수 있다.

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	5
제 1 절. 연구 개발의 목적 및 필요성 .....	5
제 2 절. 과제 목표 및 연차별 연구 수행 내용 .....	6
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	7
제 1 절. 국내 현황 .....	7
제 2 절. 국외 현황 .....	7
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	9
제 1 절. 연구수행내용 .....	9
1. 원심성형 공정 .....	9
2. 원심 성형 공정 장비 .....	9
3. 원심 성형 공정을 이용한 BSCCO 2212 초전도 튜브 제조 .....	15
4. BSCCO 튜브 성형, 미세구조 분석 및 전기적 특성 평가 .....	23
5. 부분용융 열처리 공정을 이용한 BSCCO 튜브의 향상된 임계 전류 특성 .....	35
제 2 절. 연구수행결과 .....	42
제 3 절. 파급효과 및 기대효과 .....	43
제 4 장 연구성과 .....	44
제 5 장 연구개발목표 달성도 .....	45
제 6 장 연구개발결과의 활용 계획 .....	46

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구 개발의 목적 및 필요성

고온 초전도체는 발전 이래 전기 에너지의 발전, 저장 및 수송 등 여러 전력계통 분야에 응용될 것으로 기대되어 많은 연구가 이루어져 왔다. 초전도를 이용한 전력응용 기술이 가속화됨에 따라 전력관련 기기(핵융합로, 초전도 모터, 대용량 자석, 발전기, 가속기용 자석 등)에 전력을 공급하는 고효율 초전도 전류인입선(current lead)의 개발이 필요하다. 특히 액체 헬륨이나 액체질소와 같은 냉매를 사용하는 기기의 운영 효율을 높이기 위해 열방출이 적고 통전용량이 높은 벌크형 초전도체 전류인입선이 절대적으로 요구된다. 초전도 전류인입선이 전력분야에 응용되기 위해서는 벌크형 고온 초전도체의 낮은 임계전류특성 해결이 우선적이다. 이에 c-축 입자배열을 비교적 쉽게 얻을 수 있는 Bi-계 초전도체 연구가 진행되고 있다. BSCCO-2212 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ )는 원심성형공정을 이용하여 우수한 임계전류 특성을 보이는 집합조직의 형성이 용이하고 용융 공정이 가능할 뿐만 아니라 2212 상이 형성되는 온도 범위가 넓다는 장점이 있다.

기존의 금속재질의 전류 공급부를 초전도 벌크로 대체할 시 기기운영 효율 증대 및 전류 공급부의 소형화 장점이 있다. 현재까지 BSCCO의 연구는 주로 초전도 선재 제조를 목적으로 수행되었으며 벌크 튜브 형태의 초전도 전류인입선에 대한 국내 연구는 거의 전무하다. 따라서 초전도 전류인입선의 개발 성공시, 초전도 전력 기기용 전류선의 국산화 신기술 확보를 통하여 수입 대체시 대외 협상력 강화로 인한 가격 경쟁력을 유도할 수 있다. 또한 유사 응용 기기인 초전도 한류기 소자, 자기차폐기, 벌크 자석용 BSCCO 소재 개발에 활용될 수 있을 것이다.

## 제 2 절 과제 목표 및 연차별 연구 수행 내용

최종목표: 임계전류밀도 ( $J_c$ ) = 1,000 A/cm<sup>2</sup> (at 65 K)급 전류 인입선용 BSCCO 도체용 재료 개발 (길이 10-15 cm, 직경 3 cm인 BSCCO tube형)

1차년도: BSCCO ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ , BSCCO-2212) 도체 제조를 위한 공정 기초연구 ( $J_c=500$  A/cm<sup>2</sup> at 65K)

- BSCCO 벌크 제조기술 기초연구
- BSCCO 초전도 용융/주조 성형연구
- 원심용융성형장비 (한전전력연구원 보유) 부분 개조
- 공정 기초실험 및 미세조직 연구
- 후열처리 조건 변화 및 전기적 특성 평가 기술 구축

2차년도: BSCCO 초전도 전류리드선용 도체 제조 ( $J_c=1,000$  A/cm<sup>2</sup> at 65 K)

- 길이 10 또는 15 cm, 직경 3 cm 인 BSCCO 튜브 제조기술
- BSCCO 초전도 용융공정 확립
- 초전도 벌크체의 몰드로부터의 이형기술
- 미세조직에 따른 초전도 특성 분석 및 임계전류특성 측정
- 부분용융열처리 공정에 의한 임계전류특성 향상

## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 현황

한국에서의 초전도 벌크 제조 기술은 초전도 에너지 저장장치용 베어링 개발을 목적으로 한국원자력연구원, 전력연구원 등 연구하고 있다. 대상 물질은 YBCO 초전도체이며 실제 5 cm 급 벌크형 초전도체가 에너지 저장용 베어링에 장착되어 사용중이다.

국내 초전도 연구는 대부분 초전도 선재와 시스템 개발에 집중되어 있다. 초전도 벌크 중 YBCO에 대해서는 많은 연구가 수행되어 현재 자기 부상형 초전도 전력 저장장치 등에 사용되고 있다. 반면 BSCCO의 연구는 주로 초전도 선재 제조를 목적으로 수행되었으며 전류인입선에 대한 연구는 활발하지 않다. 재료 개발에 대한 투자를 통해 현 공정의 기술적 보완을 전제로 벌크형 전류인입선 개발의 성공가능성은 상당히 높다. 원심회전 모터의 속도 조절, 열처리 공정의 세분화, 대직경을 위한 몰드 제작 및 열처리 공정 개선, flux 량의 적절한 조절 방안 등이 재료개발 연구의 중점사항이다. 정량화된 연구를 통해 높은 임계전류를 갖는 초전도 전류인입선 튜브를 개발할 수 있을 것으로 판단된다.

### 제 2 절 국외 현황

초전도 BSCCO 벌크 전류리드선은 주로 독일 연구진에 의해 개발되어 현재 Nexans에서 상품화 되어 있다. 용융주조법 (Melt cast process)으로 초전도 분말을 녹인 다음 일정형태의 주물에 부어서 제조하는 공정으로 제작된다. BSCCO 전류리드선의 임계전류밀도는 액체 질소 온도에서 최대 수천 A/cm<sup>2</sup>정도이다.

Hoechst, Rhone-Poulenc, Siemens, Alcatel 등 유럽 4개 기업 컨소시엄 (BRITE/EURAM 프로젝트)이 구성되었다. 여기서 두께와 크기를 임의로 조절할 수 있었고 임계전류밀도등의 초전도 특성도 우수하였다 (참조: 표 1). Alcatel사의 전류인입선도 MCP 방식을 이용하여 제조하였다.

Table 1. BSCCO superconductor rod bulk fabricated by MCP method.

$\emptyset$	length	cross section	critical current*	heat leak 77 - 4K 120 mm	heat leak 40 - 4K 120mm
[mm]	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[A]	[mW]	[mW]
5	up to 200	0,20	200	8,39	2,70
8	up to 300	0,50	400	21,49	6,91
10	up to 400	0,75	600	33,58	10,80
13	up to 200	1,33	1000	56,75	18,25
15	up to 200	1,77	1200	75,55	42,29

\* 77 K, 1  $\mu$ N/cm, self field

## 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

### 제 1 절 연구수행내용

#### 1. 원심성형 공정

원심성형공정은 주로 금속, 합금이나 세라믹의 튜브 제작이 용이한 공정이다. 금속과 같이 용융온도가 낮은 물질은 용융원심성형을, 세라믹과 같이 용융점이 높은 경우는 슬러리 원심성형공정으로 튜브를 제작하나 BSCCO-2212 ( $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ )와 같이 용점이 비교적 낮은 초전도체는 용융원심성형법을 이용하기도 한다. 합금이나 금속을 녹인 다음 고속으로 회전하는 원심주조용기에 용탕을 주입하면 용탕이 회전하는 몰드의 벽에 부딪쳐 응고 되는데 이러한 공정으로 BSCCO 튜브를 제조할 수 있다 (그림 1). 원심성형으로 BSCCO 튜브를 만드는 공정은 Nexans에서 개발되어 상용화되었다. BSCCO의 용융점이  $1000^\circ\text{C}$  정도로 낮기 때문에 조업이 용이하고 용체가 응고할 때 회전하는 몰드의 특정방향으로 방향성을 갖고 응고되므로 초전도 조직의 집합도를 높일 수 있는 장점이 있다.

#### 2. 원심 성형 공정 장비

BSCCO 튜브를 제조하기 위해 사용된 한전 전력연구원이 보유하고 있는 원심성형 장치는 크게 네 부분으로 나눌 수 있다. RF 유도로 및 주입구, 몰드 예열로, 몰드 회전 및 회전 모터, 그리고 냉각장치로 구분된다. 그림 2는 원심성형기의 전체적인 사진을 보여주고 있다. RF 유도로 및 주입구는 BSCCO 분말을 백금 도가니 속에 넣고 용융시켜 몰드 속으로 원활하게 주입하기 위한 가열 장치이다. 몰드 예열로는 고온의 용탕이 금속 몰드와 반응했을 때 열 충격으로 인한 튜브의 균열을 방지하는데 있어서 중요한 역할을 한다. 몰드 회전은 저속에서부터  $3600\text{ rpm}$ 까지의 고속으로 회전이 가능하며 모터부와 연결되어 있는 축에 원하는 몰드 크기를 장착할 수 있다. 마지막으로 냉각장치는 실험 공정에서 많은 열이 발생하는 RF 유도로와 원심성형기의 과열현상을 막아주는 역할을 한다.

원심성형공정은 분말의 용융 및 고속회전 등의 안전사고의 위험을 수반하고 있기 때문에 이를 방지하고자 전체공정기기를 철판으로 보호하였다. 공정의 제어는 외부 제어기를 통해서 이루어지도록 하였으며 시스템에 문제가 발생할 시에만 문을 열어 수동으로 작업할 수 있게 되어 있다. 전장은 약  $3\text{ m}$ , 너비  $1.2\text{ m}$ , 높이  $1.5\text{ m}$

이며, 내부에서의 주요작업을 외부에서 관찰할 수 있도록 기기의 중앙과 위쪽에 창을 설치되어 있다. 두 개의 창 중에서 위쪽의 창은 유도가열에 의해 용융되는 용체의 흐름을 관찰하기 위한 것이고, 중앙의 창은 몰드 속으로 용체의 주입과정과 주입부의 이동, 예열로의 이동 등을 관찰하기 위한 것이다.

BSCCO-2212를 녹이는 데 사용된 도가니로는 70  $\Phi \times 80$  h $\times$ 0.8 t (mm) 백금 도가니를 사용하였고, 금속몰드는 스텐인레스 스틸로 만들었으며 그 크기는 30  $\Phi \times 150$  h (mm)이다. 몰드가 장착된 회전부는 가변형이며 고속으로 회전하여 원심성형공정이 가능하게 한다 (그림 3). 용탕과 몰드가 만나는 주입부는 경사를 주어 용체가 원활하게 몰드내로 주입되게 하였다 (그림 4). 용체 이송부의 온도가 낮을 경우에는 용체의 이송 중에 이송부 중간에서 응고될 가능성이 있으므로 이를 방지하고자 깔때기의 외부에 열선을 부착하여 최대온도 900°C를 유지할 수 있도록 하였다.

예열부는 몰드의 예열을 목적으로 제작되었다 (그림 5). 몰드를 예열하지 않은 채 용체를 몰드에 주입하면 몰드와 용체와의 온도차이가 커서 응고체에 심각한 열충격이 발생하고 이에 따라 용체가 응고할 때 균열이 발생한다. 따라서 몰드의 예열이 중요하다. 몰드의 온도가 너무 낮을 경우에는 열 충격에 따른 균열이 발생하고 온도가 너무 높을 경우에는 공기 중에 노출된 몰드의 산화가 일어난다. 이 두 현상을 최소화할 수 있도록 몰드를 예열시켜 주어야 하며 약 500°C의 온도에서 작업할 시 산화와 균열을 최소화할 수 있다는 보고가 있다. 예열부를 3-zone으로 나누어 개별적인 온도제어가 가능하도록 설계되어 있으며 최대 가열온도는 900°C까지 올릴 수 있다.

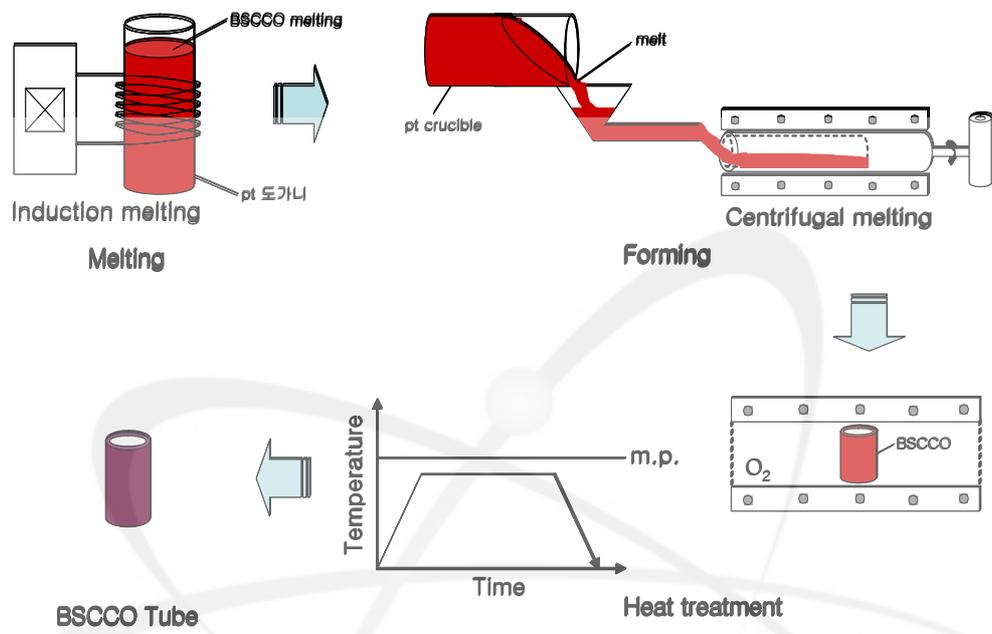


Fig. 1. Centrifugal melting process (CMP).



Fig. 2. Centrifugal melting equipment in Korea Electric Power Research Institute.



Fig. 3. Rotational mold system for centrifugal casting.

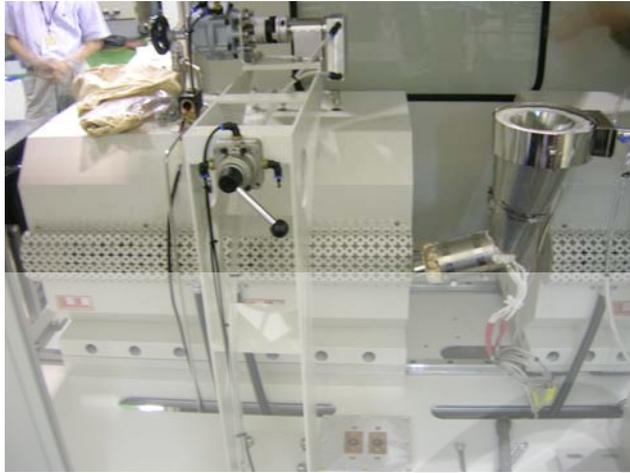


(a)



(b)

Fig. 4. (a) injector and (b) RF heater.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) mold furnace and (b) temperature controller.

### 3. 원심 성형 공정을 이용한 BSCCO 2212 초전도 튜브 제조

용융 원심성형법을 이용하여 BSCCO 2212 튜브를 제조하는데 그림 6과 같은 공정을 사용하였다. 분말을 녹여서 BSCCO 2212 튜브를 만들기 위해서는 용체를 냉각시킬 때 발생하는 열 충격에 견딜 수 있어야 한다. 또한 용체의 점도가 낮아야 몰드내로의 적절한 주입이 이루어진다. 이를 위해 하소된 BSCCO 2212 분말에  $\text{SrSO}_4$ 를 첨가하였고, 그로 인해서 튜브의 기계적 특성을 높이고 용융체의 비산을 억제시키며 용융점을 낮추는 효과를 얻었다. BSCCO 2212 초전도 한류기 튜브를 제조하는데 사용된 초기 분말은 Nexans 사에서 구입한  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+6}$  분말과 Aldrich 사의  $\text{SrSO}_4$ 를 사용하였다. 용융되는 분말은 BSCCO 2212분말과  $\text{SrSO}_4$ 을 각각 9:1의 무게비로 혼합시켰다. 건식밀링법으로 혼합된 분말은 혼합되기 전과 비교해서 결정립이 작아졌고 (그림 7)  $\text{SrSO}_4$  상이 발견됨을 (그림 8) SEM, XRD 분석을 통해 확인할 수 있었다.  $\text{SrSO}_4$ 의 첨가는 분말의 용점을 낮춰주고 제조된 튜브의 기계적 특성을 높여주는 역할을 한다. 분말을 녹이는데 사용되는 도가니로는 고용점의 백금도가니를 사용하였다.

스테인레스 스틸로 만들어진 금속몰드는 BSCCO 2212 튜브를 제조하는데 직접적인 영향을 준다. 금속 몰드는 튜브 분리 시 용이하도록 하기 위하여 일체형이 아닌 조립형으로 제작되어 있다. 몰드는 고온의 용탕을 만났을 때 발생할 수 있는 열 충격을 방지하기 위해 적절한 온도에서 충분한 시간 예열 되어져야 한다. 너무 높은 온도에서의 몰드 예열은 튜브와 금속간의 반응과 튜브 분리 시에 어려움을 유발할 수 있으므로 피하는 것이 좋다.  $550^\circ\text{C}$ 에서 약 2시간이 최적화된 조건이라 생각하여 몰드예열을 실시하였다. 또한 어려운 작업중의 하나인 튜브와 몰드와의 분리를 고려하여 몰드예열 전에 이형제로서  $\text{ZrO}_2$ 를 몰드 내벽에 얇게 도포하여 사용하였다 (그림 9). 또한, 전기적 특성 평가를 위해 Ag 테잎을 몰드의 내벽 끝에 각각 끼워 넣음으로서, 성형 후 양 끝단에 Ag 테잎이 부착된 튜브를 얻을 수 있다. 금속 몰드는 앞에서 언급한 튜브 크기  $30 \Phi \times 150 \text{ h (mm)}$ 을 사용하였다.

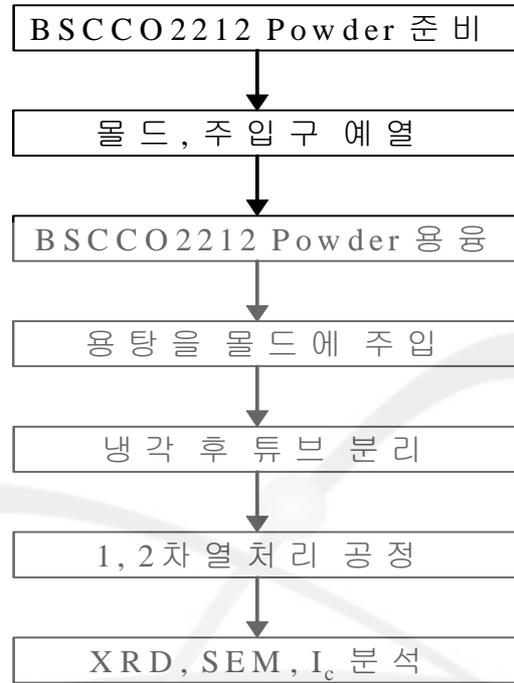
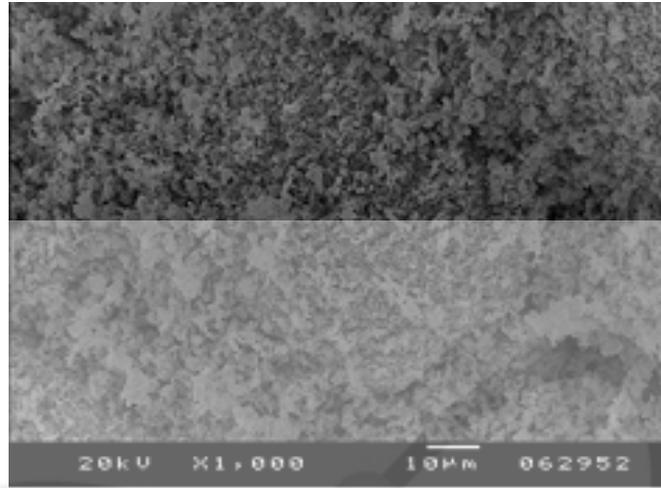
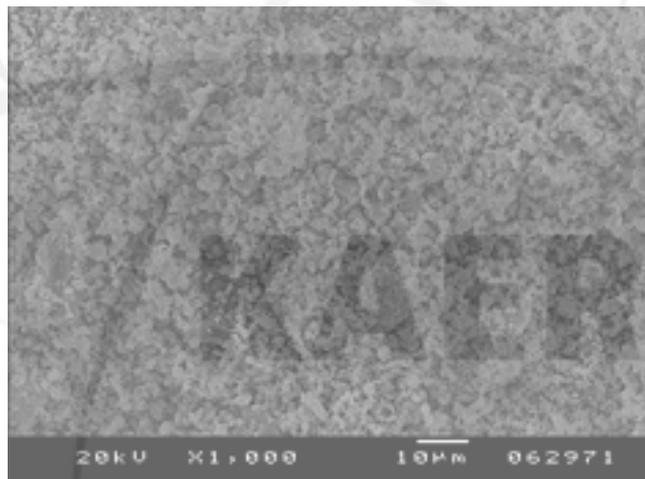


Fig. 6 Process of BSCCO tube fabrication.

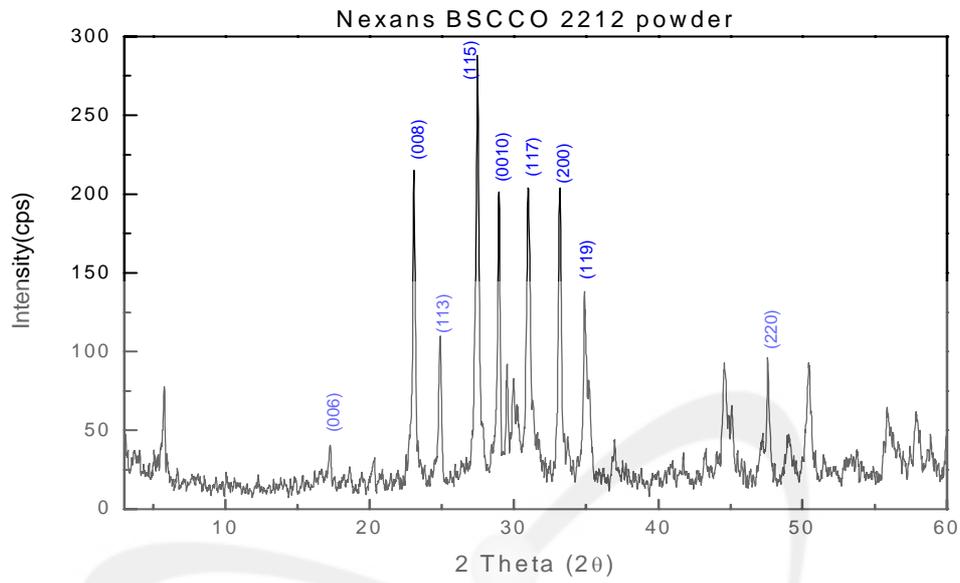


(a)

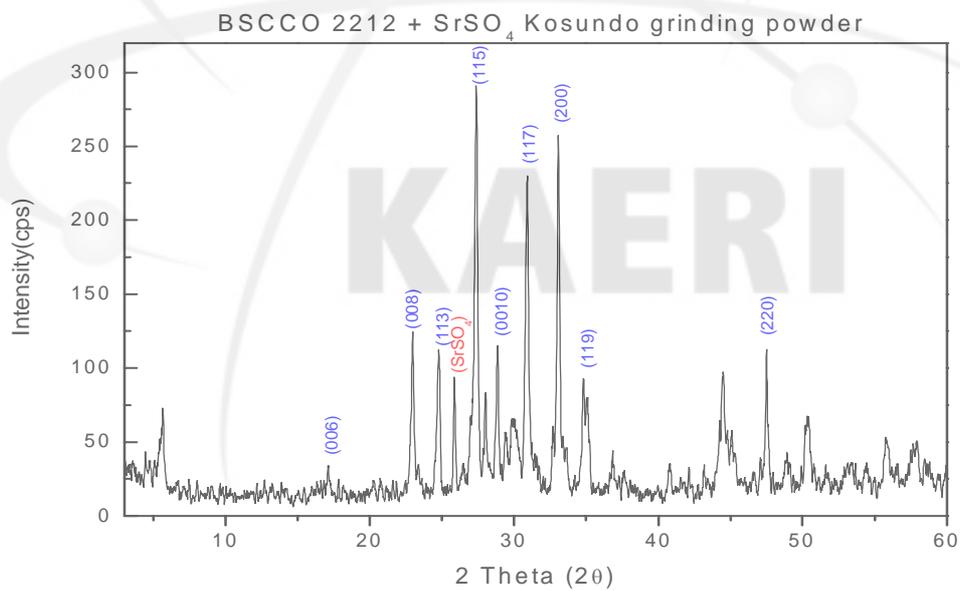


(b)

Fig. 7. SEM image BSCCO powders;  
(a) BSCCO 2212 powder ( $\times 1000$ ) (b) BSCCO 2212 powder with  $\text{SrSO}_4$  ( $\times 1000$ )



(a)



(b)

Fig. 8. XRD patterns of BSCCO 2212 powders;  
 (a) BSCCO 2212 powder (b) BSCCO 2212 powder with SrSO<sub>4</sub>



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. 30  $\Phi \times 150$  h (mm) mold (2 body);  
(a) before paste ZrO<sub>2</sub> (b) after paste ZrO<sub>2</sub> (c) attached Ag tapes

주입구는 용융된 용탕이 금속 몰드 속으로 안전하게 들어갈 수 있도록 깔때기 모양으로 제작되었다. 주입구는 고온의 용탕이 이동하는 경로이기 때문에 이동 중에 열을 심하게 빼앗기거나 응고되지 않도록 약 800℃ 이상으로 예열 되었다. (그림 10a). 30 Φ×150 h (mm) 몰드에 사용되는 주입구는 구조적으로 주입되는 입구가 좁아서 막히는 현상이 발생할 수 있으므로 주의 깊은 관심이 필요하다. 준비된 BSCCO 2212 분말은 RF 유도 가열을 통하여 용융되어진다. 고주파를 이용한 용융 방법이기 때문에 짧은 시간동안 높은 온도까지 도달할 수 있고, 완전히 용융된 상태에서는 용탕 내에 대류 현상이 발생하는 것도 육안으로 확인할 수 있다. 이러한 대류현상은, BSCCO 2212와 같은 혼합분말의 경우 용융 후 비중 차이에 의해서 잘 섞이지 않을 수 있는 부분까지 혼합 시켜 줄 것으로 사료된다. 또, 용융이 어느 정도 진행되면 용탕에서 잔류하고 있던 기체들이 표면으로 끓어올라 오는 것을 확인할 수 있다. 끓어 나오는 기체들은 튜브 내에 기공이나 결함의 원인이 될 수 있으므로 완전히 빠져나와서 안정화 될 때까지 충분히 용융시켜 준다. 실험적으로, RF 유도로를 이용하여 약 1300℃ 정도일 때 분말이 완전히 용융되고 끓어 나오는 기체 없이 용탕이 안정화됨을 확인할 수 있었다 (그림 10b). 용탕은 RF 유도로를 통하여 1300℃에서 완전히 용융되고, 800℃ 이상으로 예열된 주입구를 통하여 빠른 속도로 회전중인 550℃의 예열된 몰드 속으로 주입된다. 용탕이 몰드 속으로의 주입은 수 초 이내의 빠른 시간 내에 진행 된다 (그림 10c).

성형 된 튜브는, 몰드 예열로에서 몰드가 완전히 냉각된 후에 분리된다. 냉각은 로에서 서냉으로 이루어지기 때문에 약 48시간 정도의 많은 시간을 필요로 한다. 몰드가 완전히 냉각되면 모터 축으로부터 금속몰드는 분리되고, 분리된 몰드를 조심스럽게 세부분리 하면 원하는 튜브를 얻을 수 있다. 튜브의 길이가 길고, 그 두께가 얇아질 수록 분리하는 과정에서 균열이 빈번하게 발생하는 것을 알 수 있었다. 제조된 BSCCO 튜브는 1차, 2차 열처리함으로서 열처리 전과 비교해서 BSCCO 2212 상 형성이 확연히 많아짐을 XRD 분석을 통해 확인 할 수 있었고, 2차원 형상은 바늘과 같으나 실제 원 모습은 얇은 판상을 이루는 조직이 주사 전자 현미경으로 관찰되었다. 1차 열처리는 산소 분위기 800℃에서 약 80시간 정도, 2차 열처리는 질소 분위기 650℃에서 약 20시간 동안 진행되었다. 그림 11은 1차, 2차 시도된 열처리 스케줄을 보여주고 있다.



(a)

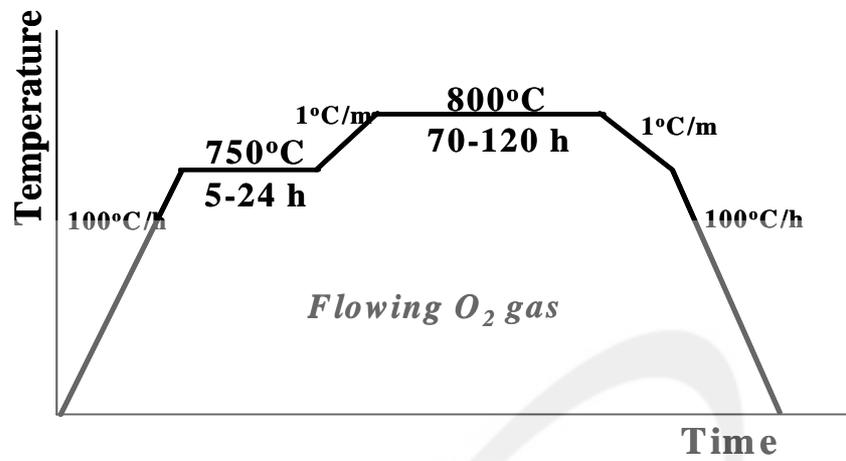


(b)

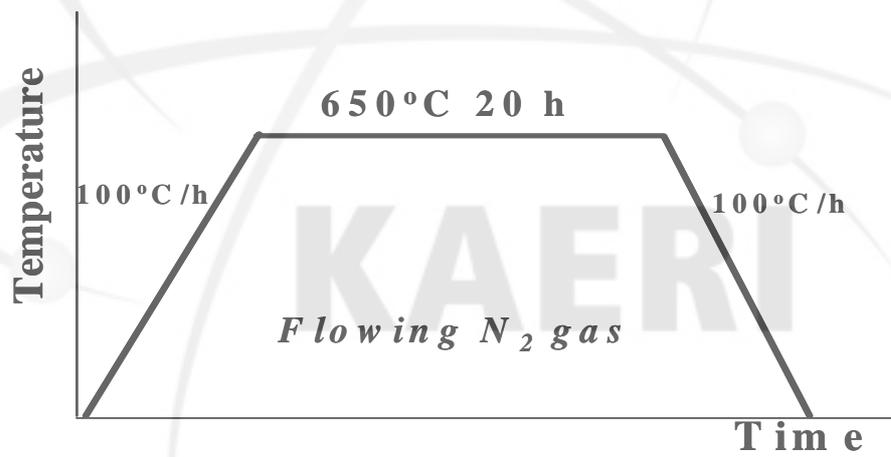


(c)

Fig. 10. BSCCO powder melting and pouring;  
(a) injector preheating (800°C) (b) completely melted BSCCO (c) pouring



(a)



(b)

Fig. 11. Heat-treatment;

(a) 1<sup>st</sup> heat-treatment in O<sub>2</sub> (b) 2<sup>nd</sup> heat-treatment in N<sub>2</sub>

#### 4. BSCCO 튜브 성형, 미세구조 분석 및 전기적 특성 평가

원심성형장치를 이용한 BSCCO 튜브 성형을 위한 기초 실험을 행하였다. 그림 12에서와 같이 회전몰드와 튜브의 온도차이로 인해 튜브가 깨지는 현상이 발생했으며 국부적으로 회전몰드와 튜브가 분리되지 않는 현상도 확인되었다. 회전몰드와 용탕의 온도차이로 인한 열 충격으로 발생하는 튜브의 균열 문제를 해결하기 위해 몰드 예열을 여러 변수를 적용해 실험해 보았으며 여러 시행착오를 경험하였다. 즉, 튜브가 회전몰드로부터 깨끗하게 분리되기 위해서는 튜브와 회전몰드 사이에 온도 차이가 있어야 하는데 온도 차이를 주었을 때는 튜브가 깨지는 현상을 보였다. 반면 튜브의 깨지는 현상을 막기 위해 회전몰드와 튜브와의 온도 차이를 감소시켰을 때는 회전몰드와 튜브가 붙어버리는 문제가 발생하였다. 튜브의 균열이 생기지 않으면서 회전몰드와 튜브가 잘 분리될 수 있는 공정 온도를 찾는 것이 매우 중요하다고 사료된다. 본 연구에서는 550°C에서 약 2시간의 몰드 예열 조건을 사용하였다. 또한 회전 몰드로부터 튜브를 안전하게 분리하기 위해서 ZrO<sub>2</sub> 분말 이형제를 사용하는 것을 도입하였다.

용융온도, 몰드 예열온도, 몰드 회전속도 등을 고려하여 30 Φ×150 h (mm) 크기의 몰드를 사용하여 성공적으로 제조된 BSCCO 2212 튜브를 그림 13에 나타내었다. 이때 사용된 실험 조건을 표 2에 보여주고 있다. 원심력에 의한 전체적인 튜브 모양을 고려하고 몰드 내부에 용탕이 균질하게 도포되도록 하기 위해서 몰드 회전 속도를 약 2520 rpm 까지 증가시켰다. 그러나 기계적으로 몰드와 튜브를 분리 하는 과정에서 잦은 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 튜브의 두께를 두껍게 했을 경우에는 균열 없이 몰드로부터 튜브를 분리할 수 있었지만, 분말 양을 조절하여 튜브의 두께를 얇게 했을 경우에는 쉽게 균열이 발생하는 것도 확인할 수 있었다. 또한 기계적 힘으로 튜브를 분리하는 과정에서 튜브에 가해지는 충격을 줄이기 위해 프레스기를 이용하여 분리하였다.

용융 원심 성형으로 제조된 튜브를 절단하여 절단면의 조밀도를 주사 전자 현미경을 통해 관찰하였다. 튜브 시편을 길이 수직 방향으로 절단하여 그 절단면을 SEM 관찰하였고, 그 결과를 그림 14에 나타내었다. 튜브의 외부로 갈수록 (그림 14(a)) 기공이 줄고 조직이 치밀하며, 내부로 갈수록 (그림 14(b)) 기공이 많아지고 불균질한 조직이 관찰되었다. 이는 용융 원심 성형에서 작용하는 원심력이 내부보다는 외부로 갈수록 그 힘이 더 강하게 작용하여 나타나는 현상으로 사료된다.



Fig. 12. 여러 폴드 예열 조건에서 폴드 분리시 부서진 튜브 형상 예.

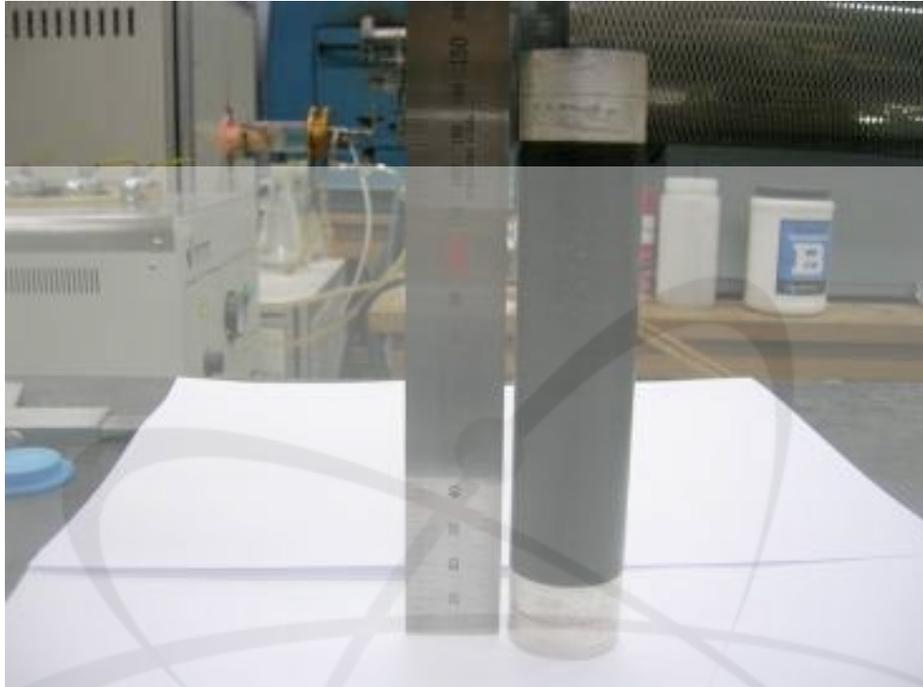
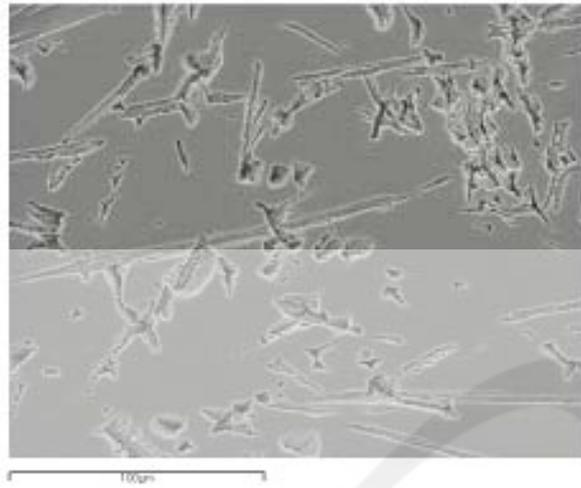


Fig. 13. BSCCO 2212 tube fabricated by centrifugal melting process ;  
 $30 \Phi \times 150 \text{ h} \times 4.0 \text{ t}$  (mm)

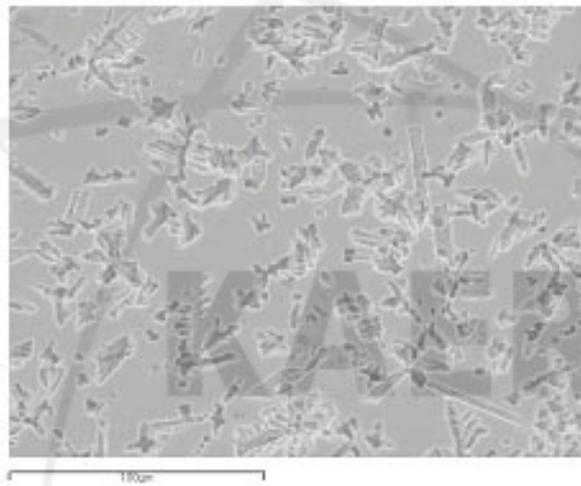
Table 2. Experiment condition for the BSCCO tube fabrication by centrifugal melting process.

몰드 크기		30 $\Phi$ ×150 h (mm)
실험 조건		
분말양(g)		300
온도(°C)	주입구	980
	몰드예열	550
	RF 유도로	1300
Ag 테잎		양 끝단에 사용
이형제		ZrO <sub>2</sub> 등 몰드 내벽에 도포
회전속도(rpm)		2520
튜브 크기		30 $\Phi$ ×150 h× 4 - 6 t (mm)

KAERI



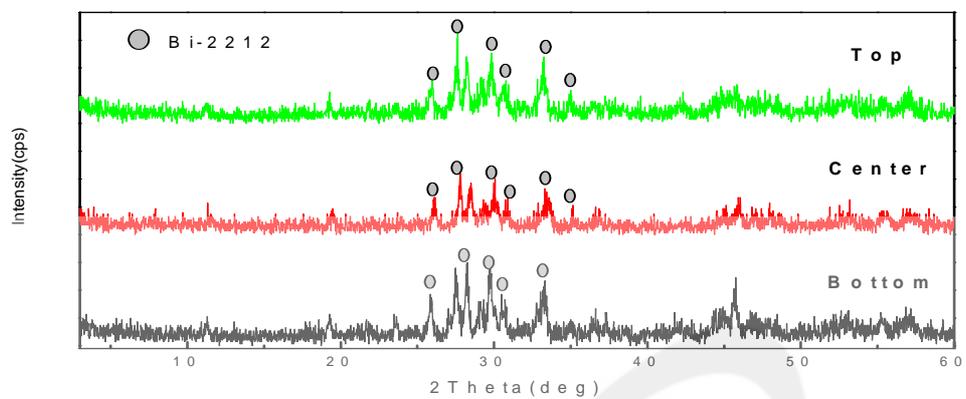
(a)



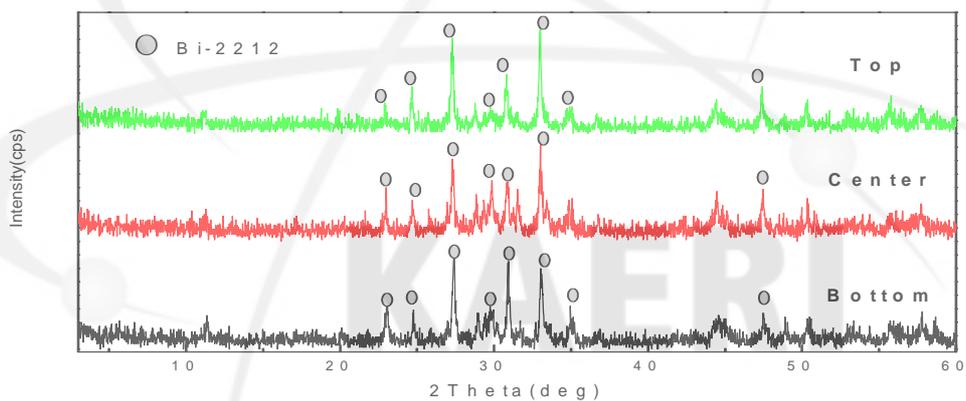
(b)

Fig. 14. SEM images of the cross section (a) outer ( $\times 1000$ ) (b) inner ( $\times 1000$ ).

그림 15는 XRD 분석을 통해 열처리 전 튜브 상부, 중부 하부의 2212 상 생성(그림 15(a))을 확인하고, 산소 열처리 후의 상 생성(그림 15(b))을 비교한 것이다. XRD 결과, 열처리 전 튜브의 상, 중, 하에서 BSCCO 2212 상과 많은 2차상들이 관찰되었다. 일반적으로 BSCCO 용탕이 응고될 때에는 응고속도에 따라 다르지만 BSCCO 2201 상이나 비정질 상이 생기는데 반해, 본 시편들의 경우에는 2차상들과 함께 약간의 BSCCO 2212 상이 포함되어 있다. 이는 응고속도가 느려서 소량의 BSCCO 2212상이 생성된 것으로 사료된다. 또한, 산소 열처리 후 BSCCO 2212 상들은 열처리 전에 비해 더 많아졌고, 강도도 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 주사 전자 현미경으로 관찰된 열처리 전의 표면사진은 평평하고 매끄러운 부분들이 대부분 관찰되었으며 상부, 중부, 하부의 전체적인 튜브길이 방향에서 비슷한 형상을 보였다(그림 16). 반면에, 산소분위기 열처리 후 SEM 분석결과 열처리 전에 비해 BSCCO 2212 상들이 다량 생성됨에 따라 시편조직에서는 바늘모양의 BSCCO 2212 상들이 관찰되었다(그림 17). 이는 2차원 형상이 바늘과 같으나 실제 원래 모습은 두께가 얇은 판상을 이루고 있다. 앞 절에서 언급한 1차, 2차 열처리 후 전기적 특성을 평가하기 위해 77 K 액체질소 하에서 튜브의 임계전류를 측정하였다. 4 단자를 이용한 통전법을 사용하였으며 실제 측정을 위해 시편 준비 모습을 그림 18에 나타내었다. 그림 19는 여러 가지로 측정된 통전 임계전류 및 임계전류밀도 측정값을 보여주고 있다. 여기서  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준을 갖고 임계특성을 측정하였다. 가공과 열처리 후, 단면적이 (a)  $6.1 \text{ cm}^2$ , (b)  $4.72 \text{ cm}^2$ 인 튜브는 77 K의 액체질소 하에서 각각  $148 \text{ A}/\text{cm}^2$ ,  $74.2 \text{ A}/\text{cm}^2$ 의  $J_c$  값을 나타내었다. 그림 20 (a)에서와 같이 단면적  $3.54 \text{ cm}^2$ 를 갖는  $30 \Phi \times 150 \text{ h} \times 4.0 \text{ t}$  (mm)로 제조된 튜브는 77 K에서 end to end 600 A의  $I_c$ ,  $169 \text{ A}/\text{cm}^2$ 의  $J_c$  값을 나타내었고, 온도에 따른 임계전류의 거동을 그림 20 (b)에 나타내었다. 측정온도가 내려감에 따라 임계전류값은 선형적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 임계전류 측정은 액체질소 시편을 담가 77 K에서 이루어 졌는데 일반적인 초전도 전력기기 운전 온도인 65 K에서의 임계전류밀도는 77 K에서 얻어진 임계전류(또는 임계전류밀도) 값에 3.5를 곱하면 된다. 즉, 앞서 언급한  $30 \Phi \times 150 \text{ h} \times 4.0 \text{ t}$  (mm) 튜브의 경우, 65 K에서 최고  $591 \text{ A}/\text{cm}^2$ 의 임계전류 밀도 값을 얻었다. 이로써 일단 과제 중간 단계 임계전류밀도 목표치인  $500 \text{ A}/\text{cm}^2$  이상을 달성하였다. 처음 시도하는 성형 단계이지만 여러 번의 시행착오를 통해 튜브 형상에 있어  $30 \Phi \times 150 \text{ h} \times 4.0 \text{ t}$  (mm) 크기의 BSCCO 도체 튜브의 제조에 성공한 것은 상당히 고무적인 결과라고 자체 평가할 수 있었다. 이것은 기초 실험 공정을 통한 튜브 제조의 시작 단계였고 다음 절에서 제조된 BSCCO 초전도체 튜브에 대한 부분용융 열처리 공정 변수에 따른 향상된 전기적 특성을 언급하였다.

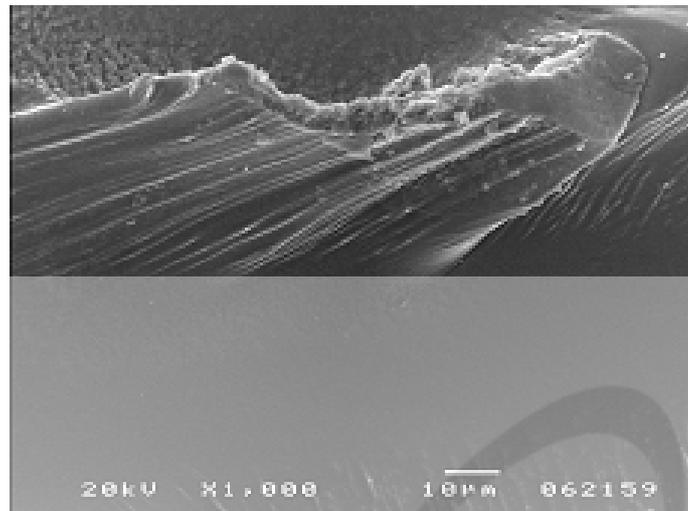


(a)

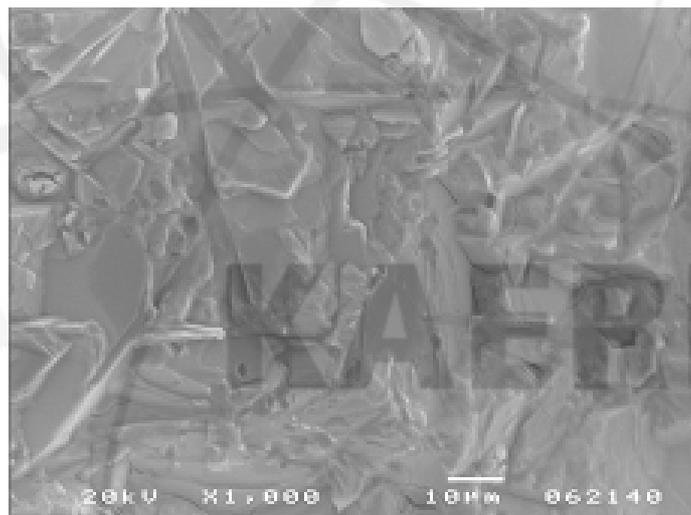


(b)

Fig. 15. XRD patterns of the tubes;  
 (a) before heat-treatment (b) after heat-treatment

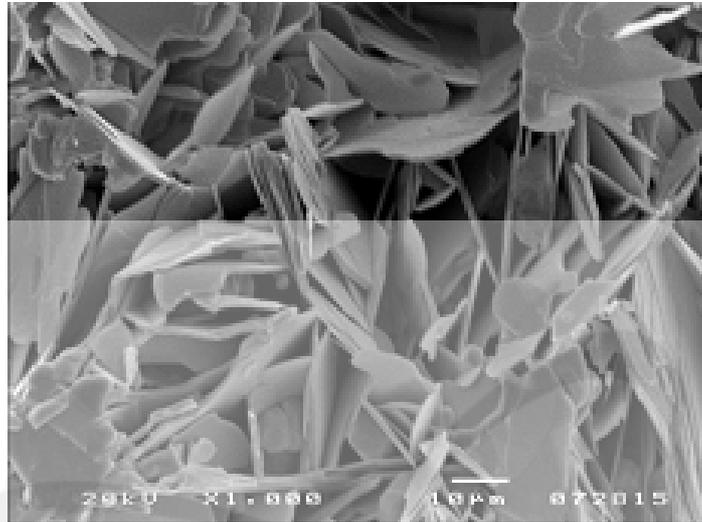


(a)

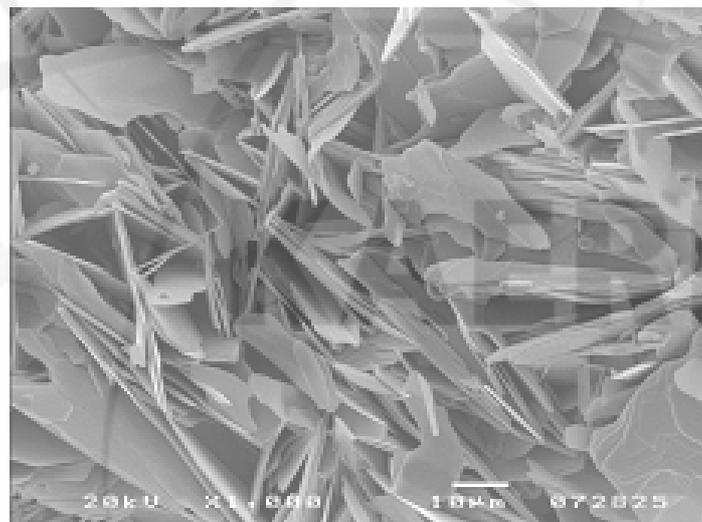


(b)

Fig. 16. SEM image before heat-treatment;  
(a) outer surface ( $\times 1000$ ) (b) fracture surface ( $\times 1000$ )



(a)

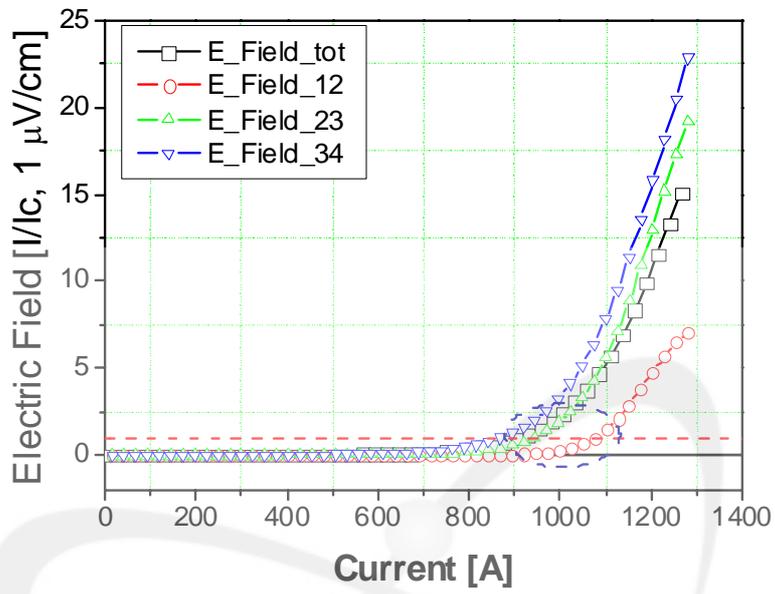


(b)

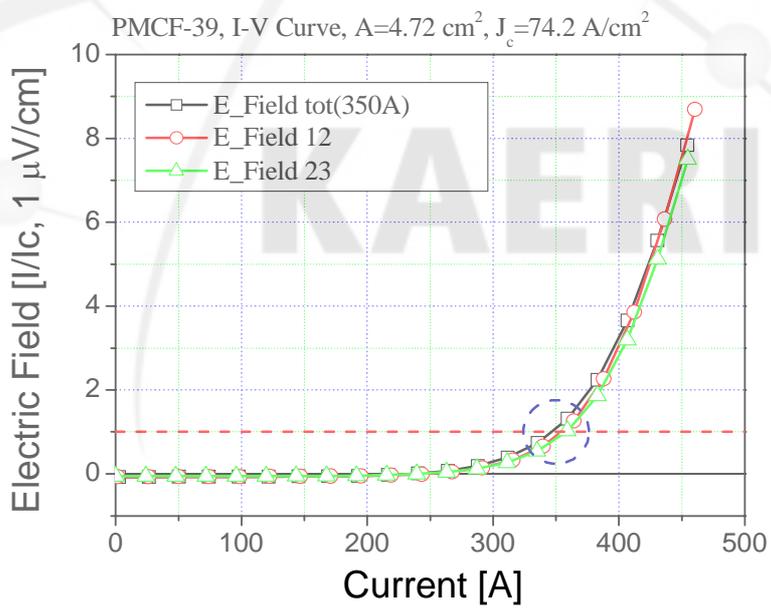
Fig. 17. SEM image after heat-treatment;  
(a) outer surface ( $\times 1000$ ) (b) fracture surface ( $\times 1000$ )



Fig. 18. Sample preparation and measurement in liquid N<sub>2</sub> for critical current density.



(a)

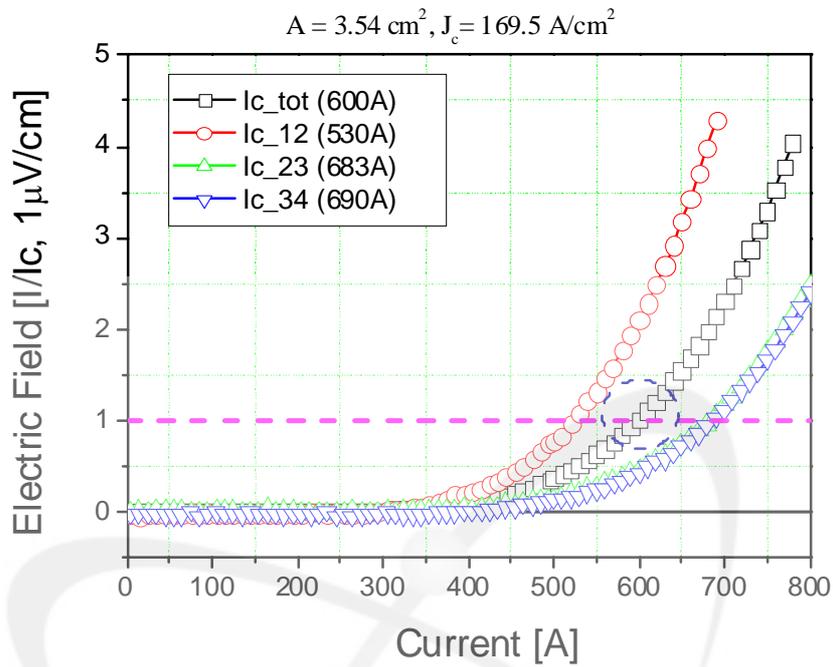


(b)

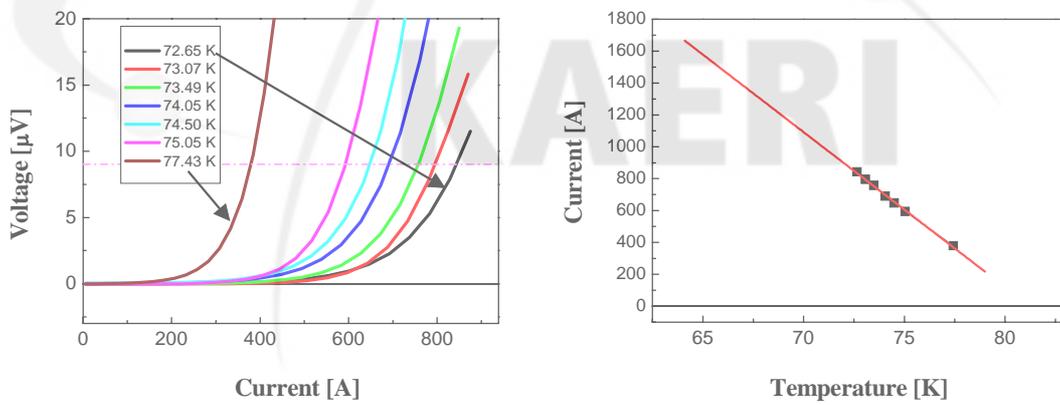
Fig. 19. Measured critical current;

(a)  $J_c = 148 \text{ A/cm}^2 @ 77 \text{ K}$

(b)  $J_c = 74.2 \text{ A/cm}^2 @ 77 \text{ K}$



(a)



(b)

Fig. 20. (a) critical current at 77 K and (b) temperature dependence on critical current.

## 5. 부분용융 열처리 공정을 이용한 BSCCO 튜브의 향상된 임계 전류 특성

본 절에서는 CMP 방법으로 BSCCO 2212 tube를 제조하여 부분용융 열처리 온도에 따른 BSCCO 2212 tube의 향상된 전기적 특성 변화와 미세조직의 관계에 대하여 분석하고 이를 기술하였다. BSCCO 초전도 튜브를 제조하는데 사용된 초기 분말은 언급한 바와 같이  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (BSCCO 2212)로 Nexans 사의 분말을 사용하였다. BSCCO 2212 분말에  $\text{SrSO}_4$  분말을 첨가하여 복합체(composite)로 제작하는 경우 BSCCO 용탕의 용융 온도와 점성을 낮추어 용탕의 물성을 조절하게 된다. 또한 세라믹 재료의 단점인 가공성과 기계적 특성이 개선되고 전기적 특성이 향상되어 실제 응용에 유리하다는 연구보고에 따라, BSCCO 2212 분말에  $\text{SrSO}_4$ 를 10wt.%를 혼합하여 사용하였다. 준비된 분말은 백금도가니에 넣고 전기로를 이용하여  $1200^\circ\text{C}$ 에서 용융되었다.

BSCCO 2212 튜브제조용 몰드는  $30 \Phi \times 150 \text{ h mm}$  크기의 스테인레스 스틸을 사용하였다. 몰드의 재질과 용탕과의 반응, 냉각 후 몰드와 튜브의 분리를 고려하여  $550^\circ\text{C}$ 에서 2시간 동안 몰드를 예열하였고,  $1200^\circ\text{C}$ 에서 완전히 용융된 용탕을 2520 rpm의 고속으로 회전하는 금속 몰드에 주입하였다. 원심력에 의해 성형된 BSCCO tube는 약 48시간 동안 로에서 서냉 후 금속 몰드에서 분리되었다. 이때 몰드에서 튜브를 쉽게 분리하기 위한 이형제로서  $\text{ZrO}_2$  대신 동종의 BSCCO 2212 분말을 사용하였고 임계전류측정을 위하여 Ag tape 단자를 튜브 끝단에 부착하였다.

제조된 tube는 BSCCO 2212의 상 형성을 위해 산소 분위기 열처리만을 행하였다 (앞에서 언급된 2차 질소 분위기 열처리 효과는 미미한 것으로 판단하여 1차 산소 분위기 열처리만 함). 그런데 본 절에서는 성형된 BSCCO 2212 튜브의 부분 용융을 위해 용융점에 가까운  $840\sim 880^\circ\text{C}$  범위의 온도까지 가열하여 5분간 유지 후, 상 형성 온도인  $810^\circ\text{C}$ 에서 120 시간 열처리하는 부분 용융 열처리를 시행하였으며 부분 용융 열처리에 따른 임계전류특성 향상 여부를 알아보려고 하였다. (그림 21 열처리 스케줄 참조) BSCCO 2212 상의 미세조직 조대화를 위해  $840\sim 880^\circ\text{C}$ 의 고온에서 부분 용융 열처리를 행하였고  $810^\circ\text{C}$ 의 낮은 온도에서의 유지 열처리는 가능한 많은 BSCCO 2212 상을 얻기 위하여 산소 분위기에서 실시하였다. 열처리 후 BSCCO tube는 임계전류( $I_c$ )와 임계전류밀도( $J_c$ )를 77 K의 액체 질소하에서 측정하였다. 통전 임계전류특성을 평가할 수 있도록 튜브 끝단에 전류 단자를 부착하고 길이 방향으로의 임계전류 특성의 균일도를 알아보기 위해 약 32mm 간격으로 4개의 전압 단자를 만들어 시편의 각 영역별 전기적 특성을 4 단자법 ( $1\mu\text{V}/\text{cm}$  criterion)으로 측정하였다. X-ray diffraction (XRD)과 scanning electron microscope (SEM)을 이용하

여 BSCCO tube의 온도별 상 분석과 미세 조직을 비교, 분석하였다.

용융 원심 성형법으로 BSCCO 2212 튜브를 제조하였으며 크기는  $30 \Phi \times 150 \text{ h} \times 4 \text{ t}$  (mm) 이었다. 제조 공정중 전기로에서  $1200^\circ\text{C}$ 의 균일한 온도와 충분한 유지시간으로 인해 용탕의 유동성과 고른 용융을 확인하였고 향상된 용탕의 물성으로 성형시 몰드로의 용탕의 주입이 용이하였다. BSCCO 2212 튜브 성형시 고속 회전으로 인한 원심력에 의해 몰드 내부에 용탕이 균질하게 도포되었고 기공이 적고 조직이 치밀한 표면성이 높은 BSCCO 2212 tube를 얻게 되었다. 또한 이형제로 인한 몰드와의 용이한 튜브 분리로 균열 생성이 적은 튜브를 제조하였다.  $840^\circ\text{C}$ ,  $860^\circ\text{C}$ ,  $880^\circ\text{C}$ 에서 부분 용융 열처리 된 튜브의 전기적 특성을 그림 22에 나타내었다. 77 K의 액체질소 하에서 측정되었으며  $840^\circ\text{C}$  열처리된 튜브 (a)는  $I_{c,tot}$  1,542 A,  $J_{c,tot}$  492  $\text{A}/\text{cm}^2$  그리고  $860^\circ\text{C}$  열처리된 튜브 (b)는  $I_{c,tot}$  1,344 A,  $J_{c,tot}$  430  $\text{A}/\text{cm}^2$ 의 값을 나타내었다. 한편  $880^\circ\text{C}$ 에서 부분 용융 열처리된 튜브 (c)에서는  $I_{c,tot}$  1,250 A,  $J_{c,tot}$  398  $\text{A}/\text{cm}^2$ 의 임계물성 값을 확인하였으나 구간별 임계전류 특성은 측정하지 못하였다. 임계전류 측정은 액체질소에 튜브 시편을 담가 액체질소의 끓는점인 77 K에서 이루어 졌는데 이미 언급한 바와 같이 일반적인 초전도 전력기기 운전 온도인 65 K에서의 임계전류밀도는 77 K에서 얻어진 임계전류 (또는 임계전류밀도) 값에 3.5를 곱하면 된다. 즉, 부분 용융 열처리 공정을 이용하여 65 K에서 최대 1,393 - 1,722  $\text{A}/\text{cm}^2$ 의 임계전류밀도 값을 갖는 BSCCO 튜브를 제조할 수 있었으며 이는 본 연구의 최종 목표치를 넘는 수치이다. 반면  $840^\circ\text{C}$   $860^\circ\text{C}$   $880^\circ\text{C}$ 등에서 부분 용융 열처리 공정없이  $810^\circ\text{C}$ 에서 120 시간 열처리된 튜브의 경우,  $I_c$  값이 832 A,  $J_c$ 가 240  $\text{A}/\text{cm}^2$ 로 부분 용융 열처리를 한 튜브들 보다 낮은  $I_c$  및  $J_c$  값을 나타내었다.

$840^\circ\text{C}$ 의 경우 영역별 임계전류 값의 분포가 매우 균일한 결과를 보였다.  $860^\circ\text{C}$ ,  $880^\circ\text{C}$ 의 부분 용융 열처리 시편의 결과, 고온에서 부분용융 효과가 잘 일어나 튜브 내의 활발한 BSCCO 2212 입자 성장으로 향상된 임계전류 특성을 예상하였던 것과 달리  $840^\circ\text{C}$ 의 임계전류특성 값보다 낮은 양상을 보이고 있다. 또한  $860^\circ\text{C}$ 의 결과 영역별 균일도가  $840^\circ\text{C}$ 에 비해 현저히 떨어지는 것을 보였으며 심지어  $880^\circ\text{C}$ 에는 튜브 내의 저항발생으로 인해 구간별  $I_c$ 가 측정되지 않음을 확인하였다. 이는 재현성 실험에서도  $840^\circ\text{C}$  열처리에서 가장 높은  $I_c$ ,  $J_c$  측정 결과를 확인할 수 있었다. BSCCO 2212 tube의 임계전류 특성이 위와 같이 부분 용융 열처리 온도에 따라 상이한 측정값을 나타내었으며 이를 알아보기로 XRD와 SEM을 이용하였다. XRD 분석 결과, 각 조건별 열처리된 튜브에서 BSCCO 2212의 특징적인 상 형성을 확인하였다. (그림 23에  $840^\circ\text{C}$  부분용융 열처리된 샘플의 대표적 예를 보임). 이는  $840^\circ\text{C}$  -  $880^\circ\text{C}$ 에서 열처리한 세 조건의 BSCCO 2212 tube의 경우 BSCCO 2212 상을 형성

하기에는 모두 충분한 열처리 조건이라 사료되며 임계전류 특성의 변화를 설명하기는 어려웠다. 한편 그림 24에서와 같이 각 조건별 튜브의 미세구조를 분석하여 열처리 온도와 임계특성과의 연관성을 알아보려고 하였다. 840°C 열처리된 튜브 단면의 미세 조직을 확인한 결과, 열처리 후 BSCCO 2212 상들이 다량 형성됨에 따라 시편 조직에서 바늘 모양의 BSCCO 2212 상들이 관찰되었다. 이는 2차원 형상이 바늘과 같으나 실제 모습은 두께가 얇은 판상을 이루고 있다. 860°C와 880°C에서 부분 용융 열처리된 튜브의 미세조직에서도 BSCCO 2212의 판상의 결정립을 확인할 수 있으나 온도가 올라갈수록 결정립의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 부분 용융 열처리된 BSCCO 2212 튜브의 임계전류 특성과 미세조직간의 관계를 연관시켜 볼 때, 860°C 이상의 고온 열처리를 부분적으로 생기는 2차상에 의해 BSCCO 2212의 결정립 성장이 방해받기 때문인 것으로 사료된다.

The logo for KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute) is centered on the page. It features a stylized atomic symbol with three elliptical orbits and three small spheres representing electrons. Below the symbol, the word "KAERI" is written in a bold, sans-serif font.

KAERI

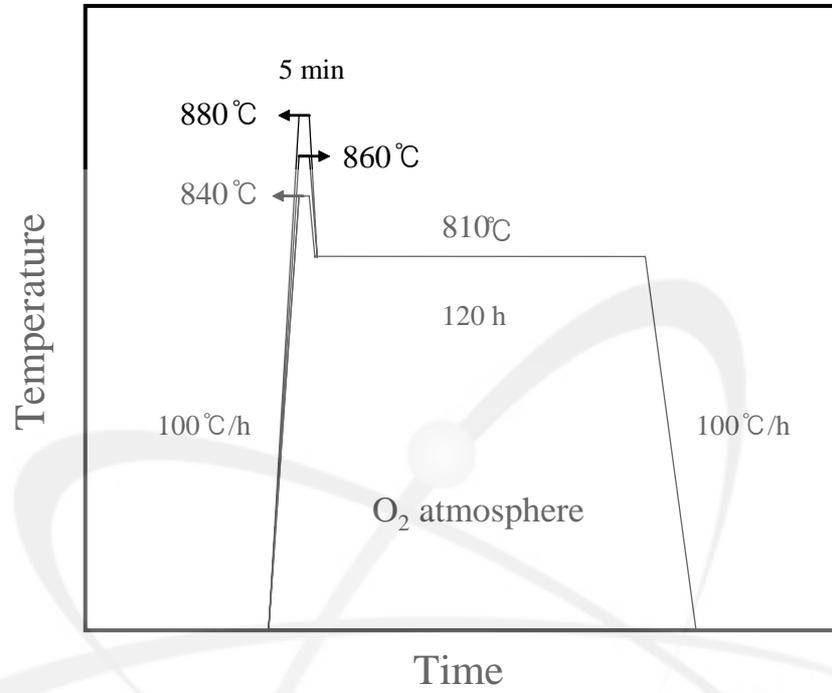
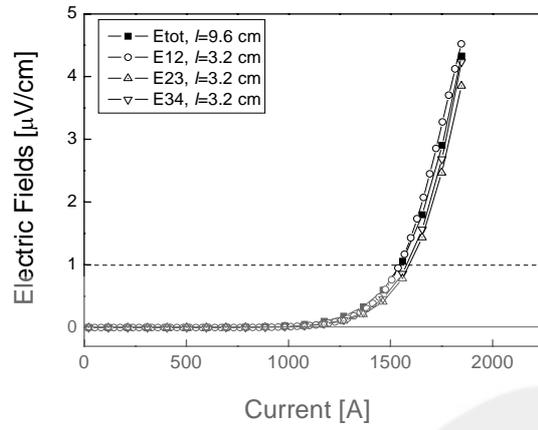
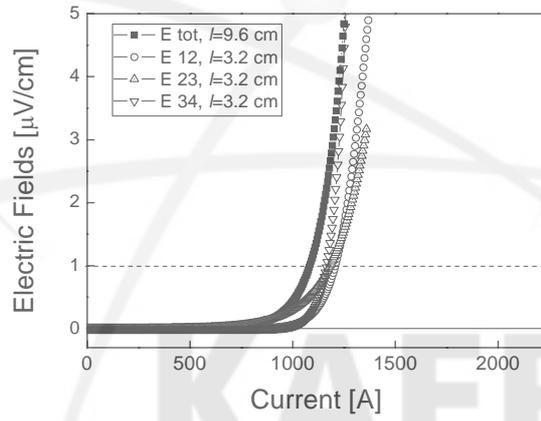


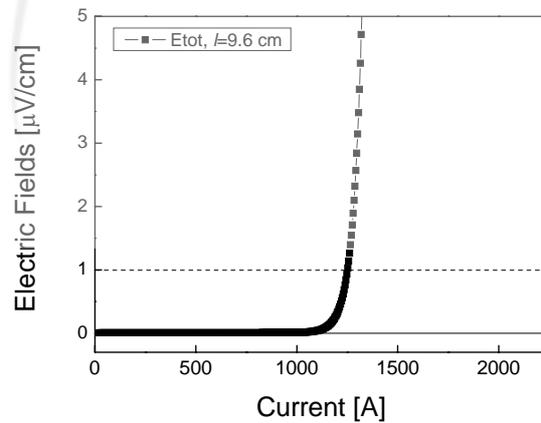
Fig. 21. Heat-treatment schedule using partial melt process for BSCCO 2212 tube.



(a)



(b)



(c)

Fig. 22. I-V curves (at 77 K) of the BSCCO 2212 tubes partially melted at (a) 840°C (b) 860°C and (c) 880°C.

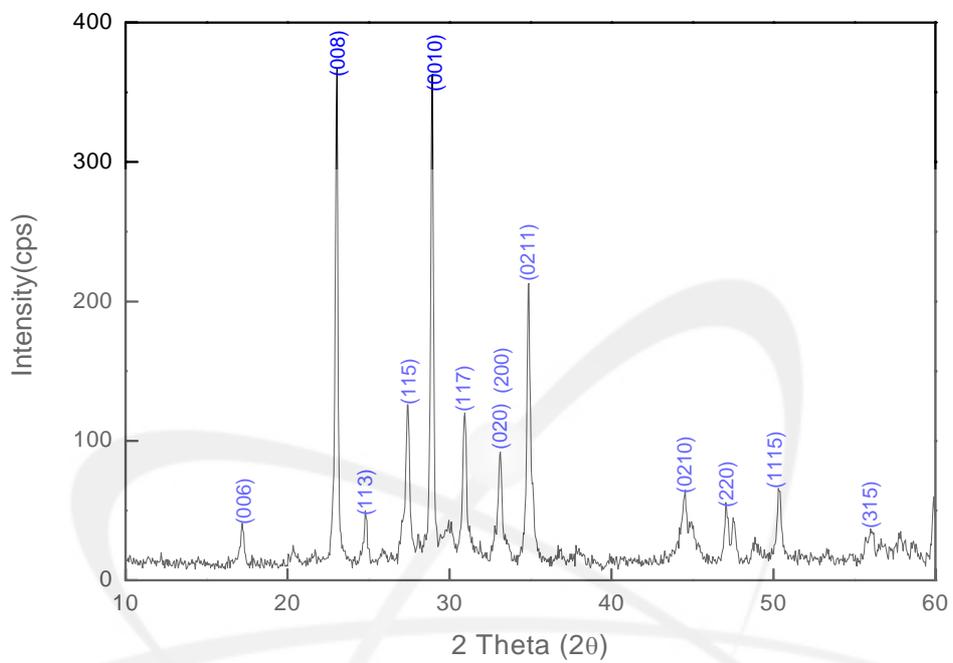
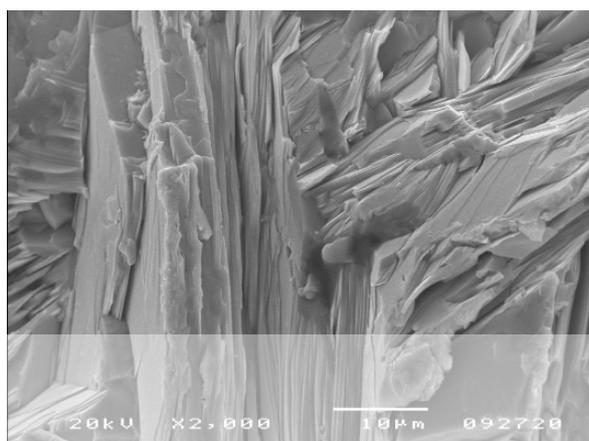
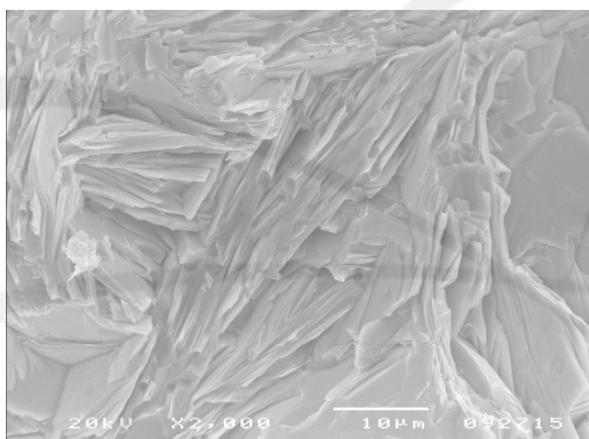


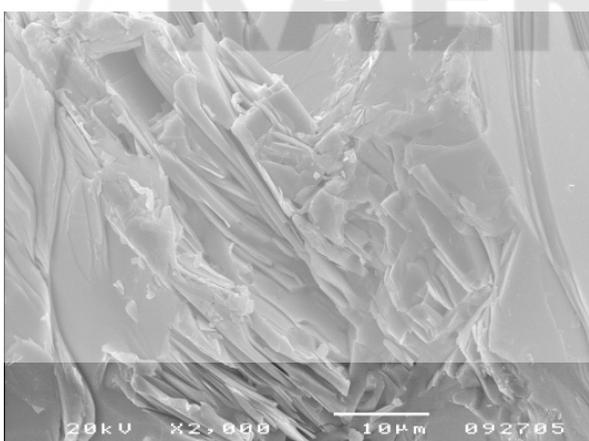
Fig. 23. Representative XRD pattern of BSCCO tube (840°C partial melt).



(a)



(b)



(c)

Fig. 24. SEM Images of BSCCO 2212 tubes partially melted at (a) 840°C (b) 860°C and (c) 880°C.

## 제 2 절 연구수행결과

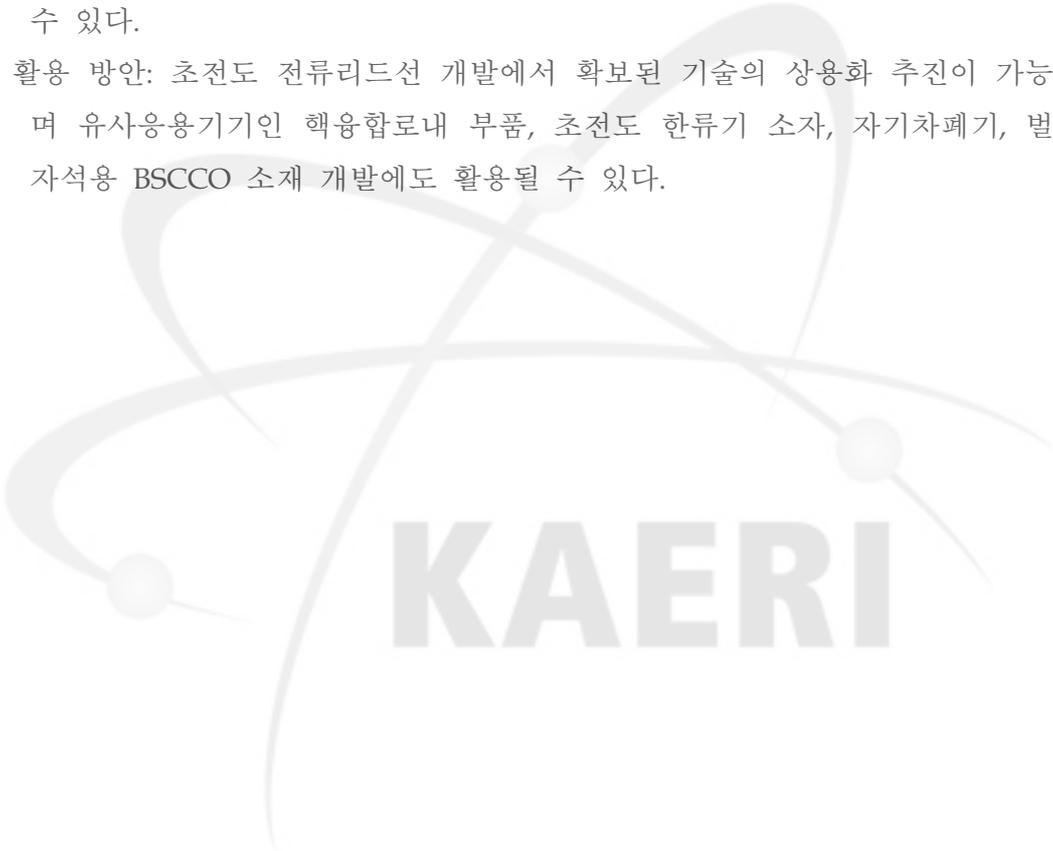
본 연구에서는 용융 원심성형 장치를 이용하여 초전도 전류인입선용 BSCCO 튜브를 제조하였다. 1200°C의 온도에서 BSCCO 초전도 분말 용융시, 용탕의 충분한 유동성을 보여 튜브 성형에 있어 균일한 조직을 형성하였다. ZrO<sub>2</sub> 또는 BSCCO 분말 이형제가 사용된 금속 몰드를 550°C에서 2시간 예열하고 2520 rpm으로 몰드를 회전시켰을 때 균질한 형상을 갖는 30 Φ×150 h ×4 t (mm)의 BSCCO 튜브가 제조되었다. 제조된 BSCCO 튜브에 대하여 840°C 860°C 880°C의 부분 용융 공정 및 810°C의 산소 분위기 열처리하는 BSCCO 2212의 상 형성에 있어 충분한 열처리 조건임을 확인하였으며 각 온도별 열처리 시편에서 BSCCO 2212 결정립을 볼 수 있었다. 임계특성 측정 결과 77 K에서 각각 492 A/cm<sup>2</sup>, 430 A/cm<sup>2</sup>, 398 A/cm<sup>2</sup> (65 K로 환산시 각각 1,722, 1,505, 1,393 A/cm<sup>2</sup>)으로 840°C의 부분 용융 열처리 온도에서 가장 높은 임계전류 값을 나타내었다. 이는 840°C의 부분용융 열처리된 시편에서 판상조직의 우수한 방향성과 큰 결정립 크기에 기인한다고 판단된다. 본 실험으로부터 840°C의 부분용융 열처리가 최적의 부분용융 온도로 사료된다.

결론적으로 원심성형 장치를 이용하여 여러 가지 공정변수, 즉 몰드 예열온도 및 시간, 몰드 회전속도, 용탕 온도, 몰드 분리를 위한 이형제 사용, 상 형성 열처리 공정, 부분용융 열처리 공정등의 변수로부터 고효율 전류 인입선용 초전도 튜브 성형을 하고자 노력하였고 본 연구의 최종 목표치인 길이 15 cm, 직경 3 cm의 BSCCO 초전도 튜브를 제조하는데 성공하였다. 또한 65 K에서 최고 1,700 A/cm<sup>2</sup>를 넘는 통전 임계전류밀도 값을 보였으며 이는 최종 연구 목표치를 초과 달성한 것이다. 추후 임계전류 특성이 더 우수한 초전도 전류인입선 튜브를 제조하기 위해서는 기 실험된 부분용융 열처리 조건을 기반으로 여러 이형제를 이용한 몰드 분리 용이성, 열처리 온도 및 시간, 튜브 형상에 대한 몰드 및 용탕온도, 분말 재료의 조성등 공정 변수의 영향 그리고 튜브 성형의 재현성 확보등의 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

자체 연구 종료후 타 기관의 장비를 이용하여 체계적인 실험 및 연구를 하기는 쉽지 않을 것으로 판단되나 내, 외부 여건이 허락하는 한 가용 인력을 활용하여 연구를 지속하고자 한다.

### 제 3 절 파급효과 및 기대효과

- 기술적 측면: 향후 과제 성공시 초전도 전류인입선의 국산화 신기술 확보를 기대할 수 있다. 소재 국산화시 소재 개발에 대한 인식을 제고할 수 있으며 벌크 초전도체의 시스템 연구를 촉진시키는 효과를 가져올 것으로 판단된다.
- 경제·산업적 측면: 초전도 전력기기용 전류인입선의 국산화 기술 확보로부터 수입대체 시 대외 협상력 강화로 인한 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 초전도 BSCCO 전류리드선 상용화시 수입대체 효과를 얻을 수 있다.
- 활용 방안: 초전도 전류리드선 개발에서 확보된 기술의 상용화 추진이 가능하며 유사응용기기인 핵융합로내 부품, 초전도 한류기 소자, 자기차폐기, 벌크 자석용 BSCCO 소재 개발에도 활용될 수 있다.



KAERI

## 제 4 장 연구성과

### 제 1 절 총괄표

(단위 : 건수)

구 분	국 내	국 외	합 계
논문 게재	1		1
논문 발표	1		1
특허 출원			
특허 등록			
프로그램등록			
기술이전실적			

### 제 2 절 연구성과별 세부목록

#### 1. 논문게재 및 발표

구 분	논문제목	기술지 (회의)	년도/권/호	주관기관 (단체)	연구 (발표)자
국내	전류인입선 응용을 위한 BSCCO 초전도 튜브의 제조	Progress in Supercondu ctivity	2009/10/2	한국초전도 학회	최정숙, 전병혁, 현옥배, 김찬중
	Fabrication of BSCCO superconductors for current lead application	KSS 2008	2008	한국초전도 학회	최정숙, 전병혁, 김찬중
국외	게재				
	발표				

## 제 5 장 연구개발목표 달성도

연구목표	연구결과	달성도(%)
<p>임계전류밀도 (<math>J_c</math>) = 1,000 A/cm<sup>2</sup> (at 65 K)급 전류 인입선용 BSCCO 도체용 재료 개발 (길이 10-15 cm, 직경 3 cm인 BSCCO tube형)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 길이 15 cm, 직경 3 cm, 두께 4 mm인 BSCCO tube 제조</li> <li>- 부분 용융 열처리 공정을 통한 임계전류밀도 1,700 A/cm<sup>2</sup> (at 65 K) 이상 달성</li> </ul>	<p>100 %</p>



KAERI

## 제 6 장 연구개발결과의 활용 계획

본 자체연구개발사업으로부터 시행착오를 거친 BSCCO 튜브의 제조 공정과 통전 임계전류 특성 분석을 통하여 많은 배움이 있었고 경험 노하우를 축적하였다. 추후 지식경제부 또는 교육과학기술부 R&D 프로그램의 중대형 과제 도출시 본 결과를 토대로 더 나은 기점에서 과제 제안을 할 수 있을 것으로 예상된다. 향후 중형 규모 과제의 도출을 위해 내, 외부적인 여건을 고려하여 정부주도 연구개발사업에 기술개발 수요조사서를 제출할 예정이다.



서 지 정 보 양 식

<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-3047/2009					
<b>제 목</b>	고효율 초전도 전류인입선용 도체 재료 개발				
<b>연구책임자 및 부서명</b>	전병혁 (중성자과학연구부)				
<b>연구자 및 부서명</b>	김찬중 (중성자과학연구부) 최정숙, 윤재성, 마흐무드 아시프, 이지혜 (중성자과학연구부)				
<b>출판지</b>	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2010. 1
<b>페이지</b>	p. 46	도표	있음( ○ ), 없음( )	크기	21×29 cm
<b>참고사항</b>					
<b>공개여부</b>	공개( ○ ), 비공개( )		<b>보고서 종류</b>	연구보고서	
<b>비밀여부</b>	대외비( ), _ 급비밀				
<b>연구위탁기관</b>	한국원자력연구원 (자체연구개발사업)		<b>계약 번호</b>		
<b>초록 (15-20줄내외)</b>	<p>용융 원심성형 장치를 이용하여 초전도 전류인입선용 BSCCO 2212 튜브를 제조하였다. 1200℃의 온도에서 BSCCO 초전도 분말 용융시, 용탕의 충분한 유동성을 보여 튜브 성형에 있어 균일한 조직을 형성하였다. ZrO<sub>2</sub> 또는 BSCCO 분말 이형체가 사용된 금속 몰드를 550℃에서 2시간 예열하고 2520 rpm으로 몰드를 회전시켰을 때 균질한 형상을 갖는 30 Φ×150 h×4 t (mm)의 BSCCO 튜브가 제조되었다. 제조된 BSCCO 튜브에 대하여 840℃ 860℃ 880℃의 부분 용융 공정 및 810℃의 산소 분위기 열처리하는 BSCCO 2212의 상 형성에 있어 충분한 열처리 조건임을 확인하였으며 각 온도별 열처리 시편에서 BSCCO 2212 결정립을 볼 수 있었다. 임계특성 측정 결과 77 K에서 각각 492 A/cm<sup>2</sup>, 430 A/cm<sup>2</sup>, 398 A/cm<sup>2</sup> (65 K로 환산시 각각 1,722, 1,505, 1,393 A/cm<sup>2</sup>)으로 840℃의 부분 용융 열처리 온도에서 가장 높은 임계전류 값을 나타내었다. 이는 840℃의 부분 용융 열처리된 시편에서 판상조직의 우수한 방향성과 큰 결정립 크기에 기인한다고 판단된다. 본 실험으로부터 840℃의 부분용융 열처리가 최적의 부분용융 온도로 사료된다. 본 연구의 최종 목표치인 길이 15 cm, 직경 3 cm의 BSCCO 초전도 튜브를 제조하는데 성공하였으며 65 K에서 최고 1,700 A/cm<sup>2</sup>를 넘는 통전 임계전류밀도 값을 보여 최종 연구 목표치를 초과 달성하였다.</p>				
<b>주제명 키워드 (10단어 내외)</b>	Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>x</sub> (BSCCO 2212), 초전도 튜브, 전류인입선, 원심성형공정, 부분용융열처리, 임계전류밀도				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-3047/2009					
Title		Development of conductor material for high efficient superconducting current lead			
Project Manager and Department		Byung-Hyuk Jun, Neutron science division			
Researcher and Department		Chan-Joong Kim, Neutron science division			
		Jung-Suk Choi, Jae-Sung Yoon, Asif Mahmood, Ji Hye Yi, (Neutron science division)			
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010. 1
Page	p.46	Ill. & Tab.	Yes( <input type="radio"/> ), No ( <input type="radio"/> )	Size	21×29 cm
Note					
Open	Open( <input type="radio"/> ), Closed( <input type="radio"/> )		Report Type		Research report
Classified	Restricted( <input type="checkbox"/> ), ___Class Document				
Sponsoring Org.	KAERI		Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)					
<p>Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>1</sub>Cu<sub>2</sub>O<sub>x</sub>(BSCCO 2212) superconductor tubes for high efficient current lead application were prepared by centrifugal melting process (CMP). BSCCO 2212 powder was melted at 1200°C in a resistance furnace using a Pt crucible and poured in a rotating cylindrical mold preheated at 550°C for 2 hour. The BSCCO tubes with 30 Φ ×150 h×4 t (mm) dimension were successfully fabricated. The solidified BSCCO-2212 samples were heat-treated by partial melting process in oxygen atmosphere. The phase identification and microstructure were investigated by XRD and SEM, respectively. The current-voltage curves at 77 K of the samples were obtained by transport measurement using liquid N<sub>2</sub>. The J<sub>c</sub> values at 77 K of the tubes partially melted at 840°C, 860°C and 880°C were 492, 430 and 398 A/cm<sup>2</sup> (1,722, 1,505, 1,393 A/cm<sup>2</sup> at 65 K), respectively. It was observed that the plate-like grains in BSCCO 2212 tube was more developed in the sample heat-treated at 840°C. It was found that the critical current of the BSCCO 2212 samples was dependent on the partial melting schedule regarding the grain shape and size of the BSCCO 2212.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O <sub>x</sub> (BSCCO 2212), superconductor tube, current lead, centrifugal melting process (CMP), partial melting heat-treatment, critical current density			