

BSCCO 초전도 선재의 미세조직 및 임계전류밀도에 미치는 공정변수 효과

논문
11-11-11

Effect of Processing Variables on Microstructure and Critical Current Density of BSCCO Superconductors Tape

지봉기*, 김태우*, 주진호*, 김원주**, 이희균**, 홍계원**

(Bong Ki Ji, Tae Woo Kim, Jinho Joo, Weon-Ju Kim, Hee-Gyoun Lee and Gye-Won Hong)

Abstract

We evaluated the effect of processing variables on microstructural evolution interface irregularity between Ag sheath and superconductor core and resultant critical current density(J_c) of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x(2223)$ superconductor tape. The value of J_c was significantly influenced by the interface irregularity, degree of texturing and relative 2223 content. The interface became more irregular(sausage effect), while the degree of texturing gradually improved as the dimension of tape decreased during forming process. As the dimension of wire/tape were changed from diameter of 3.25 mm to thickness of 0.20 mm, J_c value was observed to be increased by 10 times. In addition, optimum sintering temperature for improved J_c was observed to be 835°C in a ambient atmosphere probably due to combined effect of both improved texturing and high 2223 content.

Microstructural investigation showed the degree of texturing was degraded by the existence of both second phases and interface irregularity. It was observed that larger grain size and better texturing was developed near relatively flat interface compared to those inside superconducting core.

Key Word (중요용어) : $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x(2223)$ 선재, Critical current density(J_c), Sausage effect, Forming process, 2223 content, Texturing

1. 서 론

초전도 재료를 이용한 전력기기들은 초전도 모터 (이하 초전도 생략), 발전기, 한류기, 변압기, 송전선 등으로써 이들 기기들은 특성이 우수한 긴 선재형

태의 초전도체를 필요로 하고 있다. 전력기기용 초전도 선재는 높은 임계전류밀도(J_c), 열적·기계적 안정성, 장선 제조의 용이성 등의 면에서 PIT (powder-in-tube)법으로 제조한 $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x(2223)$ 선재가 가장 유망하다.¹⁻⁴⁾

또한 2223 선재는 4.2 K, 고자장 (> 10 Tesla)에서 NbTi와 Nb₃Sn과 같은 저온 초전도선재 보다 높은 J_c 를 가질 수 있어 보다 다양한 응용이 기대되어진다.⁵⁻⁸⁾

PIT법은 초전도 분말을 은 튜브(Ag tube)에 넣고 인발, 압연, 일축가압성형 등의 기계적 변형공정을

* : 성균관대학교 금속재료공학부
(경기도 수원시 장안구 천천동 300, Fax: 0331-290-7371
E-mail : jinho@yurim.skku.ac.kr)
** : 한국원자력연구소
1998년 8월 5일 접수, 1998년 9월 24일 심사완료

통해 선재형태로 만들고 소결 공정을 하는 일련의 방법이다. 소결 후 선재는 추가적으로 기계적 변형과 열처리를 반복하는 열기계적 공정(thermo-mechanical treatment)을 통해 J_c 의 향상을 기대할 수 있다.⁹⁾ 또한 기계적 특성과 고자장하에서 전기적 특성을 향상시키기 위해 다심 선재로 제조가 되고 있다.

2223 선재는 피복금속과 산화물 초전도심(core)으로 구성된 일종의 복합재료라고 할 수 있으며, 기계적 변형에 대하여 일반적인 금속과는 다른 반응을 보인다. 또한 재료와 변형기구(tools) 사이의 마찰력과 같은 제한요소 때문에 불균일한 변형을 하게 되고, sausage 효과 등으로 인한 불균일한 Ag/초전도심의 계면으로 인해 J_c 값을 감소시킨다.¹⁰⁾ 2223 초전도 선재가 높은 J_c 값을 갖기 위해서는 초전도상의 고순도성, 우수한 집합조직, 결정립간의 연결성, 초전도심과 피복금속 계면의 균일성 등이 확보되어야 한다.

그러므로 2223 초전도 선재를 제조하는데 있어서 분말 합성기술이나 열처리 공정 등을 최적화 하는 것과 더불어 기계적 가공에 의한 선재의 소성변형이 J_c 에 미치는 영향에 대한 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 초전도 특성에 영향을 주는 인자로서 초전도심과 계면의 불균일 정도, 가공조건, 소결 온도 등이 2223 선재의 미세조직과 전기적 특성에 미치는 영향을 파악하였다. 먼저, PIT법을 통해 가공공정의 정도를 달리하여 만든 다양한 크기의 2223 선재를 제조하였으며, 이들 시편에서 피복재료와 초전도심 사이 계면의 형태와 초전도 상(phase)의 집합조직이 초전도 특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한 열처리 온도가 초전도심의 집합도와 제 2상의 양에 미치는 영향을 XRD(X-선 회절), SEM(scanning electron microscopy)과 전기적 특성 평가를 통하여 분석하였다.

2. 실험방법

실험과정은 고상반응에 의한 2223 분말의 제조, PIT 방법에 의한 2223 선재의 제조, 그리고 미세조직의 관찰 및 이와 연관된 전기적 특성을 평가하는 것으로 요약된다.

초전도 분말의 조성이 $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_{2.0}\text{Ca}_{2.2}\text{Cu}_{3.0}\text{O}_{10+\delta}$ 가 되도록 Bi_2O_3 , PbO , SrCO_3 , CaO , CuO 분말들을 적정량 혼합하였다. 혼합한 분말을 에탄올과 알루미나 볼과 함께 폴리에틸렌 용기에 넣어 24 시간 볼밀(ball mill) 처리를 하였다. 균일하게 혼합된 슬러

리(slurry)를 건조 후 700-855°C, 대기 분위기에서 24시간, 3회 하소처리 후 800°C, 대기 분위기에서 24 시간 동안 탈기처리 하여 2223 분말을 제조하였다.¹¹⁾ 제조된 분말의 XRD 분석결과 2212 상과 2223 상의 혼합상으로 구성되어있으며, 소량의 Ca_2PbO_4 , CuO , CaCuO_2 , CaCO_3 등의 2상들이 존재하는 것으로 관찰되었다.

PIT 방법을 이용하여 선재형태로 만들기 위해 튜브형 몰드에 2223 분말을 충전하고 냉간 정수압(cold-isostatic-press, CIP방법)을 가하여 만든 성형체(compact, 직경 0.42 cm, 길이 8.5 cm)를 은 튜브(내경 0.46 cm, 외경 0.6 cm, 길이 12 cm)에 삽입하였다.¹²⁾ 성형체와 은 튜브와의 공극을 최소화시키기 위해 성형체가 삽입된 은 튜브를 다시 냉간 정수압을 가하였으며, 이후 인발, 스웨이징, 압연공정을 통해 선재를 가공하였다. 인발공정은 매 공정단계마다 단면감소율을 약 10-15%로 하여 직경 1.0 mm까지 변화시켰다. 소성변형 동안에 은 튜브의 가공경화 효과로 인한 손상을 줄이기 위해 200-600°C 온도에서 약 10-30분 동안 중간 소둔처리를 하였다. 이후 압연공정은 매 단계 두께 감소율을 약 10%로 하여 최종두께 0.10 mm까지 선재를 제조하였다.

선재의 최적 두께를 알아보기 위하여 다양한 두께의 선재를 835°C 대기 분위기에서 50시간 열처리 하여 J_c 를 측정하였고, XRD를 이용하여 집합도와 제 2상의 변화를 관찰하였다. 또한 초전도 선재의 최적 열처리 온도를 파악하기 위해 두께 0.20 mm인 시편을 810-860°C의 다양한 소결온도로 50시간 동안 대기 분위기에서 열처리한 후 미세조직을 관찰하였다.

J_c 측정은 4전자법으로 77 K, 0 T에서 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 의 기준으로 행하였다. 미세조직관찰은 광학현미경과 SEM으로 하였으며 조성분석은 EDX(energy dispersive X-ray analysis)와 XRD를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

선재의 횡측 단면에서 Ag와 초전도심 사이의 계면의 불균일성 정도를 관찰하기 위해 COV(coefficient of variation in thickness) 인자를 이용하였다.¹⁰⁾ COV 인자는 초전도심의 평균두께에 대한 측정된 두께의 표준편차로 계산되며, 선재의 횡측으로 위치 x에서 초전도심의 두께를 $t(x)$ 로, 이들의 평균두께를 $t(\text{ave})$ 로 나타내면 평균두께에 대해 위치에 따른 두께의 변화량은 $t(x)-t(\text{ave})$ 이고, 평균두께에 대한 측정된 두께의 COV 인자는 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$COV = \frac{\sigma}{t(ave)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t(x_i) - t(ave))^2}}{t(ave)}$$

σ 는 표준편차, N은 위치에 따른 측정빈도 수이며 시편 당 0.35 μm 간격으로 100-300회의 빈도수가 이용되었다.

CIP방법에 의해 만든 성형체를 은 튜브에 넣어 인발 및 압연할 때 최종 두께까지 감소시키기 위해 여러 단계의 반복적인 가공을 하였고, 공정단계별로 시편의 횡측단면에서 초전도심에 대한 표준편차와 COV 인자를 측정하여 비교하였다. 즉, 인발공정에서의 시편의 지름이 3.25, 1.85, 1.0 mm, 그리고 압연 공정에서의 시편의 두께가 0.72, 0.47, 0.31, 0.20, 0.15, 0.10 mm인 선재의 측정된 표준편차와 COV 인자 값은 표 1과 같다.

표 1. 표준편차, 평균두께, COV인자의 공정단계별 의존성

Table 1. Dependence of standard deviation, average thickness and COV factor on the sequence of drawing and rolling processes

Process	Diameter (D), Thickness (t) (mm)	σ (Standard deviation) (mm)	t(ave) (mm)	COV
Drawing	D=3.25	0.0233	1.8711	0.0125
	D=1.7	0.0231	0.9156	0.0253
	D=1.0	0.0229	0.4479	0.0511
Rolling	t=0.72	0.0222	0.4040	0.0550
	t=0.47	0.0143	0.2345	0.0609
	t=0.31	0.0093	0.1234	0.0755
	t=0.20	0.0073	0.0846	0.0857
	t=0.15	0.0069	0.0415	0.1663
	t=0.10	0.0064	0.0224	0.2852

표 1에 의하면 공정단계에 따른 표준편차(σ) 값은 소성변형과정을 거치는 동안에 0.0233에서 0.0064으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히 인발과정에서는 지름이 3.25에서 1.0 mm로 될 때까지 σ 값의 변화는 거의 없음이 관찰되었으나, 압연과정에서는 두께가 0.72에서 0.10 mm로 감소할 때까지 σ 값이 0.0222에서 0.0064 mm로 약 3.5배 정도 감소하였

음어 나타났다. σ 값은 불균일한 계면의 정도를 나타내므로 σ 값의 감소는 계면의 불규칙성이 감소되었음을 뜻한다. 그러므로 인발과정에서는 시편의 지름이 감소될수록 계면의 불규칙성 정도가 거의 변하지 않았으나, 압연과정에서는 변형이 진행될수록 계면의 불규칙성이 오히려 감소되었음을 알 수 있다. 표 1에서 보듯이 초전도심의 평균두께에 대한 표준편차로 표현되는 COV 인자는 가공공정회수가 반복될수록 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 인발 공정에서 시편의 지름이 3.25에서 1.0 mm로 감소함에 따라 COV 인자는 0.0125에서 0.0511로 증가하고, 이후의 연속되는 압연과정에서 두께가 0.10 mm로 감소됨에 따라 COV 인자는 0.2852로 증가되었다. 이는 시편이 변형됨에 따라 계면의 불규칙성은 감소되었으나, 평균두께가 상대적으로 급격히 감소하였기 때문이다. 그러므로 초전도심의 평균두께에 대한 계면의 불규칙성은 인발과 압연공정을 거치는 동안 커지는 것을 알 수 있다.

Sausage 효과에 의한 임계전류밀도의 감소정도는 초전도심의 평균두께에 대해 위치에 따른 두께의 변화정도에 관계되므로, 선재의 지름과 두께가 감소함에 따라 sausageing의 영향은 커진다고 할 수 있다. 일반적으로 sausage 효과는 초전도 선재의 응용에 다음과 같은 좋지 않은 영향을 미친다. 첫 번째, 초전도심의 단면적을 국부적으로 감소시킴으로써 임계전류값(I_c)을 감소시킨다. 두 번째, 계면의 불균일점은 선재의 제조 및 추후 선재의 조립과정에서 야기되는 응력에 대해 응력 집중점의 장소로서 균열 또는 미세균열을 발생시킬 수 있다. 세 번째, 만약 은이 초전도상 결정립의 집합성을 향상시켜 준다면, 계면을 기관으로 성장하는 초전도상들의 집합조직은 계면의 불균일성으로 인해 현저히 감소될 것이다. 이러한 sausage 현상은 은과 초전도심의 기계적인 성질의 차이를 조절하고 압연률의 조도를 향상시킴으로써 제어할 수 있을 것으로 생각된다.¹³⁻¹⁵⁾

가공공정 단계에 의해 시편의 모양과 크기가 변화하므로 이에 따른 J_c 값의 변화를 조사하기 위해, 시편들의 J_c 값을 측정하였다. 선재의 직경이 각각 3.25와 1.85 mm인 시편과 두께가 각각 0.72, 0.47, 0.31, 0.20, 0.18, 0.15, 0.12 mm인 시편을 같은 조건에서 소결한 후 측정된 J_c 값을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 보듯이 선재의 직경이 3.25 mm에서 두께가 0.20 mm로 변했을 때 측정된 J_c 값은 약 545 A/cm²에서 5765 A/cm²로 10배 가량 증가하였다. J_c 값의 크기가 전반적으로 낮았으나 시편의 크기변화에 의한

J_c 값의 변화추이는 비선형적으로 나타났다. 즉 선재의 직경이 3.25 mm에서 인발공정에 의해 직경이 감소함에 따라 J_c 값은 매우 완만하게 증가하였다. 이후 압연공정에 의해 선재의 두께가 0.72 mm로 되었을 때 J_c 값은 약 1135 A/cm²이고 두께가 0.47 mm로 감소함에 따라 J_c 값은 약 1651 A/cm²로 계속 완만하게 증가하다가, 두께가 0.31, 0.20 mm로 감소되었을 때 J_c 값은 약 3043, 5765 A/cm²로 급격하게 증가되었다. 이후, 선재의 두께가 계속 감소함에 따라 J_c 값은 급격한 감소를 나타내었으며 두께가 0.12 mm 인 경우의 J_c 값은 직경이 3.25 mm 인 경우 보다 오히려 낮았다.

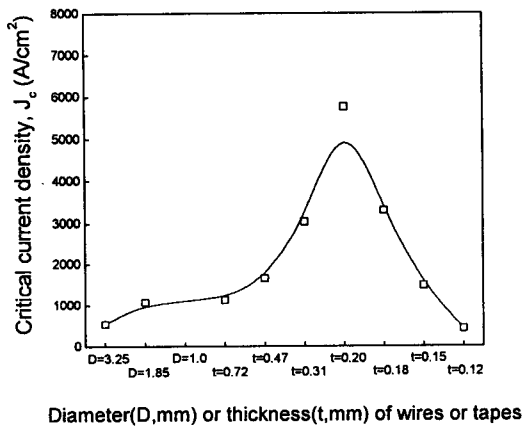


그림 1. 공정단계에 따른 임계전류밀도 변화 (소결 온도; 835°C, 소결시간; 50hr)

Fig. 1. Variations of critical current density(J_c) with different diameter/thickness of wires /tapes. Specimens were sintered at 835°C for 50hr

시편의 J_c 값이 가공공정단계가 진행될수록 증가하는 것은 결정립의 모양이나 집합조직 등의 미세조직 변화와 연관이 있을 수 있으므로 각 시편들에 대한 X-선 회절분석을 조사하여 그림 2에 나타내었다. 시편의 크기가 감소할수록 2223 상의 회절강도(peak intensity)가 증가하는데, 이는 2223 결정립의 집합성이 가공단계가 진행될수록 향상되었음을 뜻한다. 또한 초기 분말에서 관찰된 Ca_2PbO_4 , CuO 상이 소결 후에도 상당량이 잔류하고 있음을 알 수 있었다. 시편의 J_c 값이 기대한 값보다도 작은 것은 아마도 상당량의 Ca_2PbO_4 상과 소량의 CuO , $CaCuO_2$, $CaCO_3$ 등의 상들이 존재하

기 때문으로 판단된다.

집합성의 향상된 정도를 이해하기 위하여, 2223 상의 (1114)면의 회절강도값과 (0014)면의 회절강도값의 비율로써 집합성의 정도를 간접적으로 나타내었다. 선재의 크기에 따른 회절강도값의 비율을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 보듯이 시편의 직경과 두께가 감소할수록 집합성의 정도를 나타내는 회절강도값들의 비율은 증가하여, 가공공정에 따라 집합성이 향상하는 것으로 나타났다. 인발공정에 의해 시편의 직경이 3.25에서 1.0mm로 감소될 때 이 비율은 1.21에서 2.05로 매우 완만하게 증가하지만 초기 압연과정을 거쳐 두께가 0.39 mm인 시편에서는 이 비율이 5.6으로 급격하게 증가하고 두께가 각각 0.12, 0.10 mm로 감소할수록 비율이 6.70과 6.71로 계속 증가하였다. 이는 인발공정에 의해 선재가 변형될 때 결정립의 집합성은 완만하게 증가하지만, 초기 압연공정에 의해 선재가 변형될 때는 결정립의 집합성은 매우 민감하게 향상됨을 뜻한다. 이러한 집합조직의 향상은 초전도 선재의 J_c 값을 향상시키는 인자로 작용할 것이다.

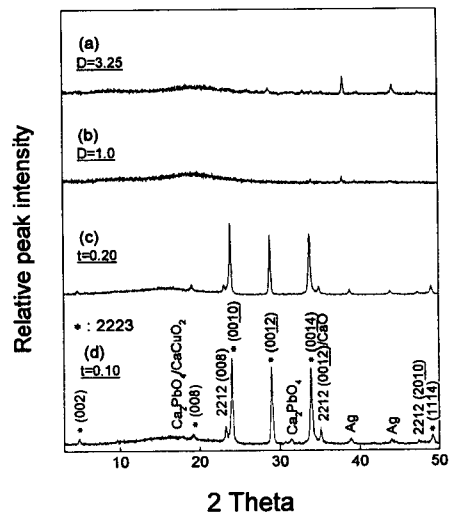


그림 2. (a) 지름 3.25 mm (b) 지름 1.0 mm wire와 (c) 두께 0.2 mm (d) 두께 0.1mm tape의 X-선 회절분석 (소결온도; 835°C, 소결시간; 50hr)

Fig. 2. X-ray diffraction patterns for wires of (a) diameter = 3.25 mm and (b) diameter = 1.0mm and tapes of (c) thickness = 0.2 mm and (d) thickness = 0.1 mm, sintered at 835°C for 50hr

반면에 표 1에서 보듯이 가공공정에 의해 시편의 두께가 감소할수록 COV 인자는 커지는데 이러한 sausage 효과의 증가는 J_c 값을 감소시킬 것이다. 그러므로 시편의 크기에 따른 J_c 값은 집합조직과 sausage 효과의 두 인자에 의해 상반되게 영향을 받을 것이다. 그림 3에 COV 인자의 역수값을 이용하여 sausaging에 의해 감소되는 J_c 값의 변화 정도를 나타내고자 하였다. 그림 1로부터 높은 J_c 값을 갖기 위한 선재의 최적두께가 0.20 mm로 나타난 것은 낮은 sausage 효과와 우수한 집합조직에 의한 것으로 판단된다.

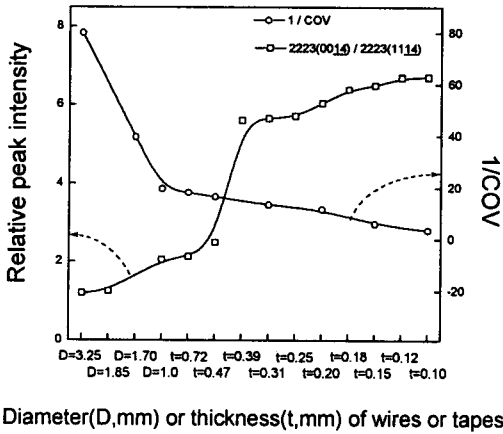


그림 3. 가공정도에 따른 집합도와 COV인자의 역수 변화

Fig. 3. Variations of degree of texturing and inverse value of COV with different diameter/thickness of wires/tapes

소결온도에 따른 J_c 값의 변화를 파악하기 위해 두께가 0.20 mm인 선재를 810-860°C의 다양한 온도로 50시간 동안 소결처리를 하였다. 각 온도에 따른 시편의 J_c 값을 그림 4에 나타내었다. 810°C에서 소결처리한 선재의 경우 J_c 값이 100 A/cm² 이하로 매우 낮았으나, 소결온도가 835°C까지 증가하면서 J_c 값도 5765 A/cm²까지 점차로 증가하였다. 소결온도가 835°C를 넘어 860°C까지는 온도가 증가함에 따라 J_c 값이 1030 A/cm²로 점차 감소하였다. 각각의 온도구간에서 열처리된 시편의 XRD 분석결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 820-835°C에서는 열처리 온도가 증가함에 따라 2223상의 강도값이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 온도가 증가함에 따라

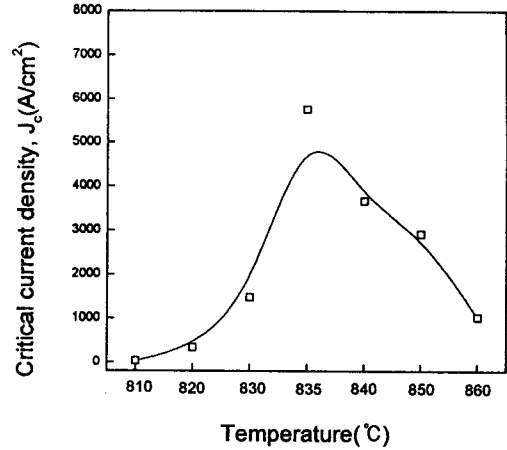


그림 4. 다양한 소결 온도에서 50시간 열처리한 0.2mm tape의 임계전류밀도 변화

Fig. 4. Variations of critical current density(J_c) of 0.2 mm tapes with different sintering temperature for 50hr

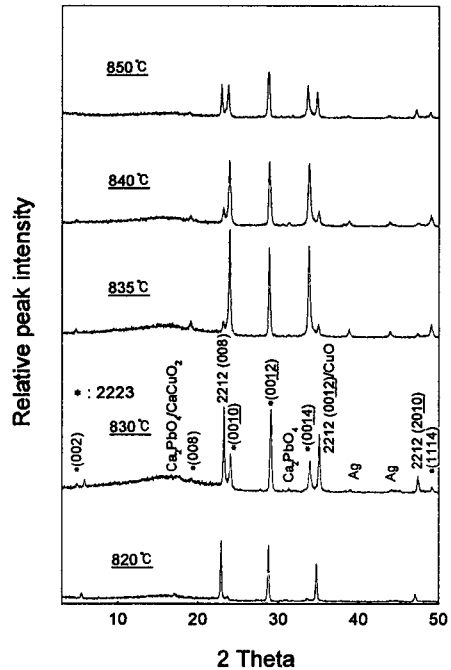


그림 5. 다양한 소결온도에서 50시간 열처리한 0.2 mm tape의 X-선 회절 분석

Fig. 5. X-ray diffraction patterns of 0.2mm tapes with different sintering temperature for 50hr

라 2212, CaCuO₂와 같은 제 2상의 회절강도값이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 소결온도가 835℃를 넘어서면서 2223상의 회절강도값은 다시 감소하는 것으로 나타났다.

선재의 소결온도에 따라 주상인 2223상의 양과 제 2상인 2212상의 상대적인 양을 비교하기 위해 2212상에서 (0012)면의 회절강도값에 대한 2223상에서 (0014)면의 회절강도값의 비율을 구하여 그림 6에 나타내었다. 820-835℃의 온도구간에서는 온도가 증가함에 따라 2212상의 (0012)면의 강도값에 대한 2223상의 (0014)면의 강도값의 비가 0.107에서 0.859로 선형적으로 증가하였다. 이는 그림 5에서 CaCuO₂, Ca₂PbO₄와 같은 2상의 회절강도값이 감소한 결과와 결부해보면 2212상과 CaCuO₂, Ca₂PbO₄상 등이 상호 반응하여 2223상을 형성하는 것으로 추측되며, 이와 같은 결과는 다른 연구 보고와도 부분적으로 일치된다.^{16,17)} 835-850℃ 온도 구간에서는 열처리 온도가 증가함에 따라 회절강도값의 비율이 감소하는 것으로 나타나 2212 상에 대한 2223 상의 상대적인 양이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 이 온도 구역에서는 Bi와 Pb가 부분적으로 증발함으로 인하여 제 2상의 생성이 촉진됨과 동시에 2223상이 분해되어 감소되는 것으로 생각된다.

소결온도에 의한 2223 상의 집합조직의 변화를 그림 3에서와 같이 (1114) 면에 대한 (0014) 면의 회절강도값의 비율로써 그림 6에 나타내었다.

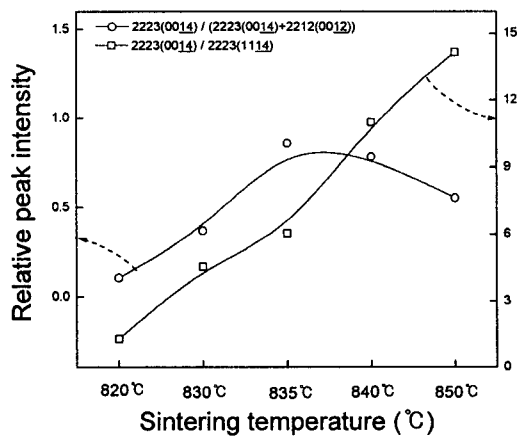


그림 6. 소결온도 변화에 따른 집합도와 BSCCO-2223 함량 변화

Fig. 6. Variation of degree of texturing and relative content of BSCCO-2223 phase with different sintering temperature

820-850℃ 범위에서 소결온도가 증가할수록 회절강도값의 비가 선형적으로 증가하므로 2223 상의 집합조직은 향상되는 것을 알 수 있다. 그러므로 소결온도가 835-840℃ 이었을 때 J_c값이 높게 나타난 것은 2223 상의 양이 증가됨과 함께 집합조직이 향상되었기 때문으로 생각된다.

초전도선재의 미세구조를 관찰하기 위해 선재를 횡단면 축에 평행하게 연마한 후 표면을 부식 처리하여 SEM으로 관찰하였다. 그림 7은 두께 0.20 mm인 선재의 횡단면에 대한 조직사진으로써 2223상의 집합조직이 관찰되며 또한 다른 명암으로 보이는 제 2상이 불규칙하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 제 2상에 대한 EDX 분석결과 2212, Ca₂PbO₄, CuO, CaCuO₂ 등의 상들이 존재하는 것으로 확인되었으며, 이중 상당량이 Ca₂PbO₄ 상으로 관찰되었다.



그림 7. 초전도 선재의 길이 방향 단면 사진

Fig. 7. SEM photomicrograph of longitudinal cross section of superconductor tape

집합조직은 그림 8에서 보듯이 결정립이 시편의 횡단축방향을 따라 배열된 형태로 관찰된다. 2223 결정립의 배열은 상대적으로 모양과 배열이 다른 2상의 존재로 인해 2상의 주위에서 국부적으로 불규칙해지므로 집합성이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Ag/2223 계면의 형태가 편평할 경우 직선형태의 계면이 기판(template) 작용을 하여 계면과 접한 부분에는 2223 결정립의 크기와 집합성이 초전도심 내부에 비해 향상된 것으로 나타났다. 계면에서 2223 결정립의 성장은 Ag와 초전도상과의 상호작용으로 인하여 촉진되는 것으로 생각된다. 이러한 상호작용은 DTA 분석결과 2223 재료와 2223-Ag 재료에 대한 용융 시작온도(melt onset temperature)

가 차이가 나는 사실에 의해 뒷받침되나¹⁸⁾, 상호작용에 대한 명확한 해석은 아직 완전히 규명되지 않은 상태이다.

그림 8에 의하면 초전도심 내부에 비해 계면주위에 상대적으로 우수한 집합조직이 형성되어 있으며 그 두께가 약 5 μm 로 관찰되었다. Hellstrom¹⁹⁾, Flukiger²⁰⁾ 등에 의하면 초전도 선재에서 대부분의 초전류는 계면주위에 형성되는 약 10 μm 정도의 우수한 집합조직을 통해 전달된다고 주장하였다. 그러나 본 연구의 관찰에 의하면 그림에서 보듯이 계면주위에 우수한 집합조직도 계면의 형태가 편평한 경우에만 해당되며, 계면의 형태가 불규칙적인 경우에는 관찰되지 않았다. 계면주위의 미세조직은 여러 그룹에 의해 연구되었는데, Yamada,²¹⁾ Larbalestier²²⁾ 등은 계면주변의 결정립이 초전도심의 내부보다 더 크고 집합조직도 더 우수하며 2상이 적다고 주장하였으며, Glowacki²³⁾, Grasso²⁴⁾ 등은 계면주변과 초전도심 내부의 집합조직은 차이가 없이 같고, 오직 2상의 정도만 차이가 난다고 주장하였다. 그러나 그림 7, 8에 의하면 계면의 형태가 우수한 국부적인 부분에서만 초전도 결정립이 초전도심 내부보다 크고 집합조직도 우수한 것으로 나타났으며, 2상의 정도에 대한 차이는 명확하게 관찰되지 않았다.



그림 8. 표면 근처 2223 상의 형상을 보여주는 초전도 선재의 길이 방향 단면 사진

Fig. 8. SEM photomicrograph of longitudinal cross section of superconductor tape showing 2223 grain morphology near interface

4. 결 론

인발과 압연과정을 통해 초전도 선재의 크기가 감소할수록 초전도심에서의 집합조직도 향상되나, 반면에 평균 두께에 대한 계면의 불균일한 정도는 심화되어 sausage 효과가 커지는 것으로 나타났다. 집합조직과 sausage 효과는 선재의 J_c 값에 상반되는 인자로 작용하므로 높은 J_c 값을 갖기 위한 선재의 적정두께는 약 0.20 mm로 관찰되었다. 적정 소결온도는 대기분위기에서 50시간 열처리하였을 때 약 835°C로 나타났는데 이는 우수한 집합조직과 2223 상의 양이 증가함에 따른 것으로 생각된다. 초전도 선재의 미세구조 관찰결과 2223 결정립의 집합성은 2상의 존재와 계면의 불규칙성으로 인해 국부적으로 감소하였다. 반면에 계면의 형태가 편평하면 계면 주위의 2223 결정립 크기와 집합성은 초전도심 내부에 비해 향상된 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1997년 한국한술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. K. Heine, J. Tenbrink and M. Thoner, Appl. Phys. Lett., 55, 2411 (1989)
2. K. H. Sandhage, G. N. Riley, Jr. and W. L. Carter, JOM, 3, 21 (1991)
3. G. N. Riley, Jr. and W. L. Carter, Amer. Ceram. Soc. Bull., 72, 7, 91 (1993)
4. L. Martini, Supercond. Sic. Technol., 11, 231 (1998)
5. Y. Yamada, M. Satou, T. Murase, S. Nomura, S. Murase, T. Koizumi and Y. Kamisada, in *Advances in Superconductivity VI* (T. Fujita and Y. Shiohara, eds), Springer-Verlag, Tokyo, 609 (1994)
6. Y. Yamada, T. Masegi, M. Satou, K. Yamamoto, S. Nomura, O. Horigami, H. Ogiwara, S. Kimura, T. Fujioka, T. Hasegawa and Y. Kamisada, International Cryogenic Materials Conference, 1994 Topical Conference : the Critical State in

- Superconductors 1994
7. U. Balachandran, A. N. Iyer, P. Haldar and L. R. Motowidlo, JOM, 9, 54 (1993)
 8. Q. Li, G. N. Riley, Jr., R. D. Parrella, S. Fleshler, M. W. Rupich, W. L. Carter, J. O. Willis, J. Y. Coulter, J. F. Bingert, V. K. Sikka, J. A. Parrell and D. C. Larbalestier, IEEE Trans. Appl. Supercond., 7, 2, 2026 (1997)
 9. P. Halder, J. G. Hoehn, Jr., J. A. Rice and C. R. Motowidlo, Appl. Phys. Lett., 60, 4, 495 (1992)
 10. K. Osamura, S. S. Oh and S. Ochiai, Supercon. Sci. Technol. 5, 1 (1992)
 11. 김원주, 유재근, 이희균, 홍계원, 한국재료학회지, 7, 2, 140 (1997)
 12. 장건익, 홍계원, 고온초전도학회, 용평, 199 (1996)
 13. Z. Han and T. Freltoft, Appl. Supercond., 2, 201 (1994)
 14. Z. Han, P. Skov-Hansen and T. Freltoft, Supercond. Sci. Technol., 10, 371, (1997)
 15. Jinho Joo, Ph. D. Thesis in Illinois Insitute of Technology, Chicago, IL, USA (1993)
 16. J. Joo, J. P. Singh and R. B. Poeppel, Supercond. Sci. Technol., 6, 6, 421 (1993)
 17. W. Wong-Ng, C. K. Chiang, S. W. Freiman, L. P. Cook and M. D. Hill, Amer. Ceram. Soc. Bull., 71, 8, 1261 (1992)
 18. J. Joo, J. P. Singh, T. Warzynski, A. Grow and R. B. Poeppel, Appl. Superconductivity, 2, 6, 401 (1994)
 19. E. E. Hellstrom, Mater. Res. Soc. Bull., Aug., 45 (1992)
 20. R. Flukiger, T. Graf, M. Decroux, C. Groth. and Y. Yamada, IEEE Trans. Magn., 27, 1258 (1991)
 21. Y. Yamada, J. Q. Xu, J. Kessler, E. Seibt, W. Goldacker, W. Jahn and R. Flukiger, Physica C 185, 2483 (1991)
 22. D. C. Larbalestier, X. Y. Cai, Y. Feng, H. Edelman, A. Umezawa, G. N. Riley Jr. and W. L. Carter, Physica C, 221, 299 (1994)
 23. B. A. Glowacki, W. Lo, J. Yuan J. Jackiewicz and W. Y. Liang, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 3, 1, 953 (1993)
 24. G. Grasso, B. Hensel, A. Jeremie and R. Flukiger, Physica C, 241, 45 (1995)