

Crystal growth and transport current properties of cylindrical (YSmNd)-Ba-Cu-O superconductors by zone melt growth method

So-Jung Kim[†] and Jong-Kuk Park^{*}

Department of Electrical and Electronic Engineering, Hanzhong University, Donghae 240-713, Korea

^{*}Department of Electrical Engineering, Kangwon National University, Samcheok 245-711, Korea

(Received September 1, 2011)

(Revised September 19, 2011)

(Accepted September 23, 2011)

Abstract (YSmNd)_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-x} [(YSN)1.8] high T_c superconductor was directionally grown by zone melt growth process, in air atmosphere. In this study, optimum melting temperature and growth rate were 1100°C and 3.5 mm/hr, respectively. The microstructure of well-textured (YSN)1.8 samples were examined by XRD, optical microscopy, TEM and SQUID magnetometer. The critical current density of these samples were measured by the direct transporting current method. In the observation using an optical microscopy, nonsuperconducting (YSmNd)₂BaCuO₅[(YSN)211] inclusions of (YSN)1.8 superconductor uniformly distributed within the superconducting (YSmNd)Ba₂Cu₃O_x[(YSN)123] matrix. The directionally melt-textured (YSN)1.8 superconductor showed an onset T_c ≥ 90 K and sharp superconducting transition. The transport J_c values were 830 A and 3.93 × 10⁴ (A/cm²) at 77 K self-field, respectively.

Key words (YSmNd)_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-x}, Superconductor, Zone melt growth, (YSmNd)₂BaCuO₅

존멜팅법을 이용한 원통형 (YSmNd)-Ba-Cu-O계 초전도체의 결정성장 및 수송 전류 특성

김소정[†], 박종국^{*}

한중대학교 전기전자공학과, 동해 240-713

^{*}강원대학교 전기공학과, 삼척 245-711

(2011년 9월 1일 접수)

(2011년 9월 19일 심사완료)

(2011년 9월 23일 게재확정)

요약 존멜팅법을 이용해서 (YSmNd)_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-x}계 고온초전도체를 대기 중에서 용융성장실험을 하였다. 존멜팅법의 최적용융온도는 1100°C였으며 성장속도는 3.5 mm/h 였다. 한 방향으로 용융성장 된 (YSN)1.8 초전도체는 XRD, 광학현미경, TEM을 이용하여 미세구조를 관찰하였으며 SQUID magnetometer와 직접전류수송법을 이용해 초전도특성을 평가하였다. 특히 용융성장 된 (YSN)1.8 초전도체의 광학현미경에 의한 미세구조 관측 결과 초전도상인 (YSN)123 matrix내에 비초전도상인 (YSN)211 inclusions이 균질하게 분포되어 있는 것이 관측되었다. 또한 용융성장 된 (YSN)1.8 초전도체는 90 K 이상의 임계온도 특성을 보였으며 액체질소 안에서 직접전류수송법으로 측정한 결과 수송전류 830 A에서 3.93 × 10⁴(A/cm²)를 갖는 높은 임계전류밀도 특성을 보였다.

1. 서론

임계온도 77 K 이상에서 초전도성이 나타나는 YBCO계 산화물 초전도체가 1987년 발견되면서 열기가 시작

된 고온초전도체에 관한 연구는 현재 실용화를 위해 한창이다. 초전도체의 응용분야는 산업전반에 걸쳐 매우 폭넓게 전개되리라 사료되며 특히 대전력 에너지수송 및 전기기기분야에 실용화되기 위해서는 선재 및 벌크형태의 높은 자기장 영역에서도 우수한 전류밀도 특성을 보이는 초전도체의 개발이 급선무라 할 수 있다. 그러나 기존의 YBCO초전도체는 제조공정이 용이하고 zero T (tesla) 영역에서 우수한 초전도 특성을 보이고는 있으나

[†]Corresponding author

Tel: +82-33-520-9322

Fax: +82-33-521-9407

E-mail: sjkim@hanzhong.ac.kr

고자기장 영역에서는 임계전류밀도특성이 현저하게 떨어지는 단점을 보이고 있어 대전력 에너지수송 분야의 실용화에 문제시 되고 있는 실정이다. 이러한 맥락에서 선재 및 벌크형 고온초전도체의 실용화를 위해 해결해야 하는 과제가 외부 자기장 영역에서의 높은 임계전류밀도 값의 실현을 들 수가 있는데, 이러한 높은 임계전류밀도 값을 구현하기 위해서는 초전도체의 초기조성의 선택과 새로운 제조공정의 도입이 유력시 된다고 할 수 있다. YBCO초전도체의 단점을 보완하기 위한 일환으로 연구가 진행된 고자기장 영역에서 높은 임계전류밀도를 얻는 고온초전도체를 얻고자하는 노력의 결실은 기존의 YBCO 초전도체의 Y자리를 희토류계 원소로 대체시킨 구조인 REBCO(RE = Sm, Nd, Gd 등)초전도체를 탄생시켰다. 그러나 이러한 희토류계 고온초전도체($RE_{1+x}Ba_{2-x}Cu_3O_{7-y}$)는 희토류 원소가 Ba 자리로 치환되는 고용체 구조를 형성하고 있어 대기 중에서 제조할 경우 초전도특성이 현저하게 저하되는 단점을 안고 있어 OCMG(oxygen controlled melt growth)[1-3]라는 별도의 산소분압공정을 부가적으로 행하여야 하는데 이러한 부가적 공정은 제조단가를 높이게 되고 생산성을 저하시키게 되는 결정적 단점으로 작용하고 있다. 한편 일반적인 고전적 세라믹 제조공정법으로 제조된 다결정형 초전도체에는 입계(grain boundary)에서의 약한 결합(weak link)으로 인해 시편 전체적으로 전류밀도 특성이 크게 제한되는 단점을 안고 있으며 이러한 입계에서의 weak link 문제를 해결하기 위해 제조공정에 대한 많은 연구가 진행되어 입계들을 일정한 방향으로 배열하는 제조공정들이 제기되었다. 이러한 제조공정법에는 다결정을 단결정으로 성장시키는 방법으로 S. Jin에 의한 용융성장법(melt-textured growth process)[4]을 들 수 있으며 원통형 길이방향으로 용융하기 위해서 존멜팅성장법(zone melt growth process)[5-11]이 도입되어 초전도체의 weak link를 해결하여 높은 임계전류밀도를 얻는 연구결과가 보고되었다. 특히 이러한 존멜팅성장법은 각종 초전도기기의 전류도입부에 응용이 가능한 선재형 길이방향의 고온초전도체 용융성장법에 많이 응용되고 있다. 본 연구에서는 YBCO계 고온초전도체보다 초전도특성이 우수한 벌크 및 선재형의 고온초전도체를 OCMG법이 아닌 대기 중에서 제조하여 응용 할 목적으로 기존의 YBCO계 고온초전도체에 희토류 원소인 Sm과 Nd를 치환한 구조인 $(YSmNd)_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-x}$ [이하 (YSN)1.8]계 고온초전도체를 합성해서 원통형 길이방향으로 제조했으며, 특히 이러한 (YSN)1.8 고온초전도체에서 초전도특성을 향상시키기 위해 존멜팅법을 이용해 대기 중에서 용융성장 실험을 하였다. 이렇게 용융성장된 (YSN)1.8 고온초전도체의 미세구조와 초전도특성을 평가해서 그 우수성을 보였으며, 특히 용융성장된 원통형 길이방향의 (YSN)1.8

초전도체에 직접 전류를 수송하여 전류밀도 값을 평가해 우수성을 확인하였다.

2. 실험방법

상업용 초전도시약으로 순도 99.9 % 이상의 Y_2O_3 , Sm_2O_3 , Nd_2O_3 , $BaCO_3$ 그리고 CuO 초전도 분말을 이용하여 (YSN)1.8 조성이되도록 합성하였으며 특히 초전도 상인 $(YSmNd)Ba_2Cu_3O_x$ [이하(YSN)123]에 비초전도 상인 Y_2BaCuO_x [이하(Y211)], Sm_2BaCuO_x [이하(Sm211)] 그리고 $Nd_4Ba_2Cu_2O_x$ [이하(Nd422)]를 약 30 mol%가 되도록 하여 (YSN)1.8의 초전도체를 초기조성으로 합성하였다. 이렇게 얻어진 (YSN)1.8 초전도체는 YBCO초전도체의 전기적 특성을 향상시키는 첨가제로 알려진 CeO_2 를 1 wt% 첨가하여 최종적으로 (YSN)1.8 초전도체를 합성하였다. 최종 합성된 초전도체 미세분말은 $920^\circ C$ 의 온도에서 약 15시간씩 3번에 걸쳐 하소를 하였고 하소과정을 거친 분말은 미세화를 기할 목적으로 분당 500의 회전속도로 attrition milling을 하여 최종적으로 sub-micron 크기의 미세한 초전도분말을 합성, 제조하였다. 제조된 초전도체 미세분말은 존멜팅법으로 용융성장 실험을 위해 원통형 길이형상으로 성형되었으며 rubber mold와 600 MPa 이상의 압력을 갖는 냉간정수압성형(CIP)을 이용해 외경과 내경 그리고 길이가 각각 5 mm, 2 mm, 10 cm 정도인 green rod로 제조되었다. 원통형상의 green rod는 $950^\circ C$ 에서 7시간에 걸쳐 열처리를 하였으며 이후 온도구배가 약 $250^\circ C/cm$ 이상인 존멜팅성장로(zone melting furnace)를 이용해 $1100^\circ C$ 의 온도에서 시간당 3.5 mm의 성장속도로 일방향 용융성장실험을 하였다. 용융성장실험이 끝난 초전도용융체는 $450^\circ C$ 온도에서 약 100시간에 걸쳐 산소화산 열처리 공정을 하여 최종적으로 (YSN)1.8 고온초전도체를 얻었다. 용융성장된 (YSN)1.8 고온초전

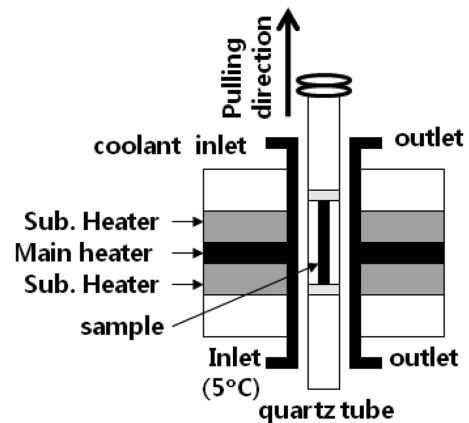


Fig. 1. Schematic diagram of zone melt growth process.

도체는 XRD, 광학현미경 그리고 TEM을 이용하여 재료 특성과 미세구조를 관찰하였으며 DC SQUID magnetometer를 이용해 임계온도를 측정하였다. 임계온도가 결정된 (YSN)1.8 고온초전도체는 4단자법을 이용해 초전도체에 직접 전류를 흘리는 방법인 직접전류수송법에 의해 최종적으로 수송전류와 임계전류밀도를 평가하였다. Fig. 1에 본 실험에 사용된 존멜팅 용융성장로의 개략적인 장치도를 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

존멜팅법에 의한 용융성장실험을 하는 경우 제조공정의 많은 변수가 있겠으나 그 중에서 주요 요인으로는 존멜팅 용융성장로의 최적 용융온도(melting temperature, T_m)와 성장속도(growth rate, R) 그리고 용융성장로의 온도구배(temperature gradient, G)를 들 수 있으며 제조공정의 환경과 용융성장 시킬 재료에 따라 다양하게 그 값이 결정될 수 있다. 본 연구에서 채택한 최적용융온도와 성장속도는 각각 1100°C 와 3.5 mm/hr 였으며 이미 보

고된 많은 연구실험을 토대로 결정되었다. Fig. 2는 위에서 기술한 최적용융온도와 성장속도로 대기 중에서 용융성장 시킨 (YSN)1.8 초전도체의 사진모습으로 외관상 양호하게 용융성장된 모습을 보여주고 있다. Fig. 3은 존멜팅법으로 용융성장된 (YSN)1.8 초전도체의 (00L)면으로의 결정성장된 XRD pattern으로 그림에서 보여주듯이 (00L) 면을 따라 결정방위가 나타나고 있는 결과로 미루어 존멜팅법으로 용융성장된 초전도체가 일방향으로 고르게 결정성장되고 있음을 확인할 수 있었다. 용융성장된 초전도체의 경우 산소화산공정을 통해야만 초전도성이 나타나고 있으며 이러한 산소화산공정을 거친 초전도체의 미세구조를 평가하였다.

Fig. 4는 Fig. 2의 그림에서 보여준 A부분에 대한 광학현미경 미세구조사진으로 c-축에 수직인 a-b면을 따라 일방향으로 균질하게 용융성장된 모습을 보여주고 있다. Fig. 5는 용융성장된 초전도체의 TEM 미세구조모습으로 관측결과 초전도상인 123 matrix 내에 비초전도상인

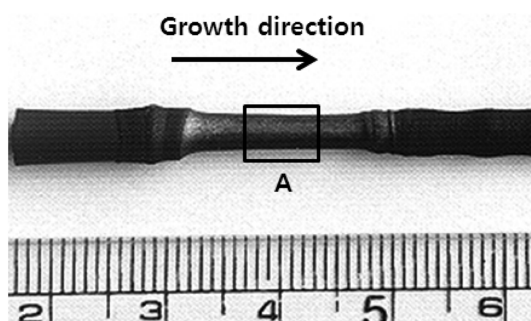


Fig. 2. Photograph of the (YSN)1.8 sample grown by zone melt growth method in air.

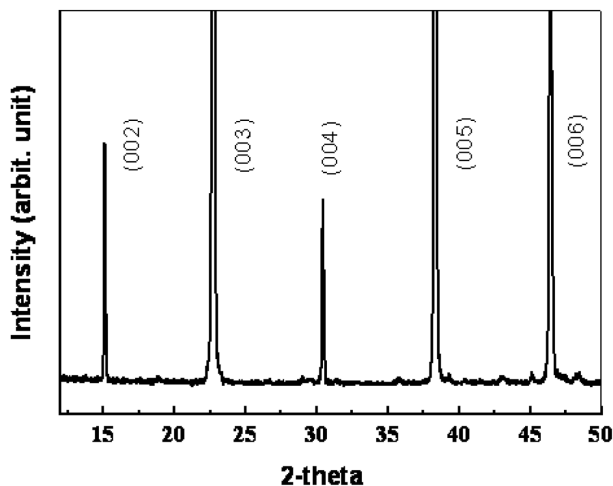


Fig. 3. XRD pattern of the as-grown (YSN)1.8 crystal.

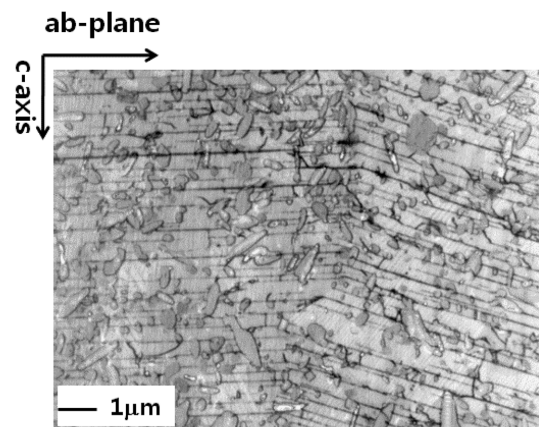


Fig. 4. Optical micrograph of the as-grown (YSN)1.8 crystal with 1 wt% CeO_2 additive.

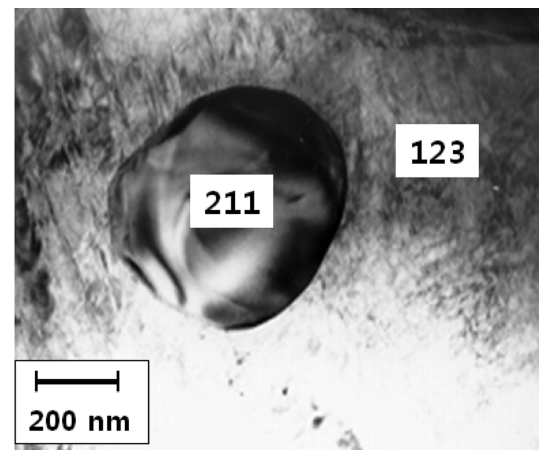


Fig. 5. TEM bright field image of the as-grown (YSN)1.8 crystal with 1 wt% CeO_2 additive, showing 211 inclusions and 123 matrix.

211 inclusions의 모습이 sub-micron 크기의 원형상으로 관측되고 있다. 통상적으로 211 inclusions의 형상은 Y211과 Sm211의 경우 원형상으로 관측되나 Nd422의 경우는 원형상을 포함해 irregular한 형상을 보이는 것으로 보고되고 있다[1, 3]. 또한 그림에서 211 inclusions 주위에 쌍정(twin boundary)의 모습이 관측되었는데 이러한 쌍정은 후에 언급할 crack의 일종으로 초전도체의 flux pinning site로 존재하게 되며 궁극적으로 초전도특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다.

Fig. 4에서도 원형상과 수지형상의 길이형태의 inclusions들이 123 matrix를 중심으로 다양하게 분포되고 있는 모습을 확인할 수 있었으며 이러한 균질하게 분포된 inclusions들은 최종적으로 초전도특성을 향상시키는 것으로 알려지고 있다. 이와 병행해서 초전도특성을 향상시키는 것으로 알려진 불순물들은 산소화산처리 이후에 초전도체 123 matrix 내부에 관측되는 crack(plate boundary, twin boundary, dislocation, stacking faults)으로, 이러한 crack들은 c-축에 수직한 수지형상을 하고 있으며 산소화산 열처리 공정을 거친 후 초전도체 123 matrix 내부 tetragonal phase가 orthorhombic phase로의 전이에 따른 것으로 그 origin은 123 matrix와 211 inclusions의 열팽창계수에 기인하며 123 matrix와 211 inclusions의 계면에서 생성되어 ab면상의 [100]과 [010] 방향을 따라 결정 내부로 확산 전파되고 있는 것으로 알려지고 있다[11-16].

Fig. 6은 존멜팅법으로 용융성장되어 산소화산 열처리 공정을 마친 (YSN)1.8 초전도체의 용융성장된 모습이다. 직접전류수송법으로 전류수송을 위해 양단에 Ag 후막코팅을 처리한 이후의 모습으로 길이방향으로 균질하게 일방향 용융성장된 모습을 보여주고 있다. Fig. 7은 용융성장된 (YSN)1.8 초전도체의 DC SQUID magnetometer에 의한 임계온도특성을 보여주는 것으로 측정에 사용된

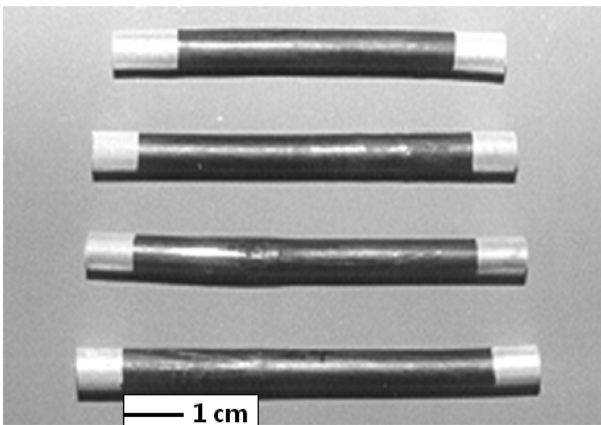


Fig. 6. Photograph of the as-grown (YSN)1.8 crystal (cylindrical type).

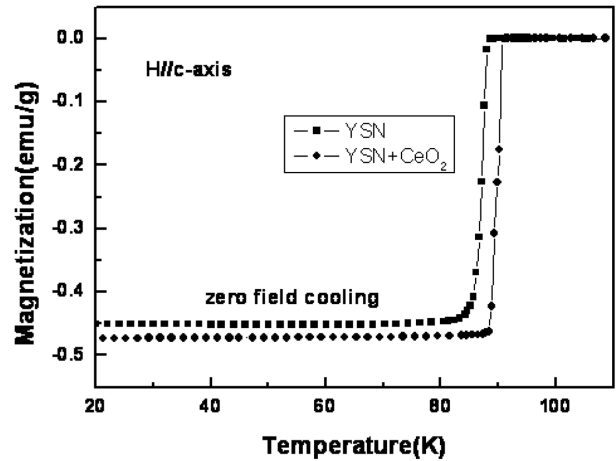


Fig. 7. Temperature dependence of magnetization for the directionally melt textured (YSN)1.8 superconductors.

초전도체 판상의 작은 시편은 c-축상에 평행하게 10 (Oe)의 자기장을 인가하면서 zero field cooling상태에서 측정하였다. 임계온도 측정결과 CeO₂가 미량 첨가된 시편의 경우 임계온도 90 K 이상의 특성을 보이고 있으며 첨가되지 않은 시편의 경우도 액체질소 온도인 77 K 이상의 임계온도특성을 보이고 있다.

선재형 및 벌크형으로 초전도체를 실용화하기 위해서는 초전도체 시편 전체에 직접 전류를 흘려야만 한다. 그러나 대부분 전류밀도 값의 평가는 SQUID 등에 의한 초전도체의 특정 작은 부분을 이용하는 간접적인 방법으로 전류밀도가 측정 평가되고 있으며 이 경우, 시편 전체에 전류를 수송시키는 직접전류수송법 전류밀도 값과 비교해 다소 차이를 보이고 있는 것이 현실이다. 본 연구에서는 실용화를 위한 토대를 마련하기 위한 일환으로 초전도체에 직접 전류를 수송하는 직접전류수송법에 의해 전류밀도 값을 평가하였다.

Fig. 8은 직접전류수송법에 의한 임계전류밀도를 측정하기 위한 개략도로 4단자법을 이용해 액체질소 안에서

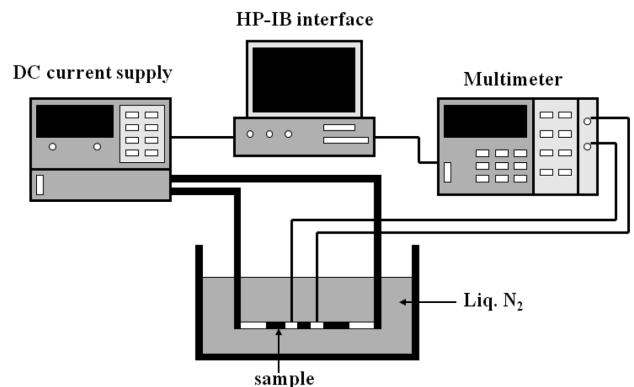


Fig. 8. Measuring system by 4-probe direct current transporting method.

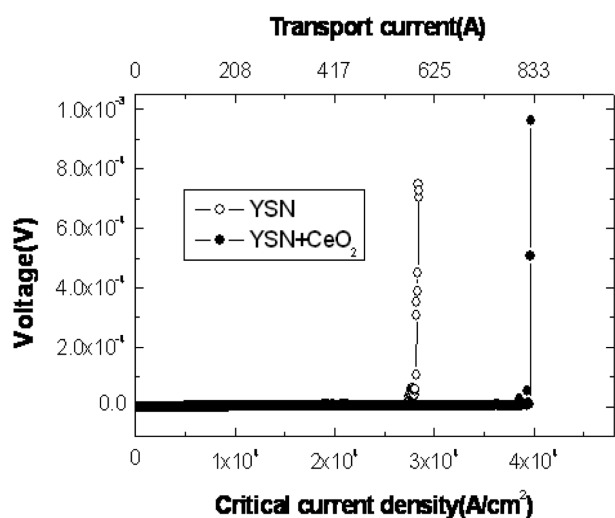


Fig. 9. Current densities of the (YSN)1.8 superconductors by 4-probe direct current transporting method.

Fig. 6에서 보여주었던 (YSN)1.8 초전도체 시편을 이용해 측정하였다. DC 전류공급장치는 최대 850 A를 흘릴 수 있는 장치(HP 6608)를 이용했으며 초전도체 시편에 전류를 흘리면서 각각의 전압강하를 측정(HP 3457)해 임계전류밀도 값을 평가하였다. 이렇게 해서 얻어진 임계전류밀도 값을 Fig. 9에 나타내었다.

평가된 임계전류밀도 값은 미량의 CeO_2 가 첨가된 시편과 그 값을 비교 해보았으며 그 결과 CeO_2 가 미량 첨가된 시편의 임계전류밀도 값이 첨가되지 않은 것보다 향상된 결과를 보였다. 일반적으로 제2상 물질인 CeO_2 는 비초전도상인 inclusions의 크기와 형상을 제어하는 역할을 하며 이 결과 (YSN)1.8 초전도체 내부에 존재하는 inclusions의 형상과 크기를 원형상의 작은 크기인 flux pinning site로 작용하게 하여 초전도특성을 향상시키는 것으로 알려져 있다[12-14, 16, 17]. 이러한 것에 비추어 위의 결과는 CeO_2 가 첨가되어 초전도체 내부에서 전류의 흐름을 방해하지 않는 pinning site 역할을 충실히 수행함으로써 임계전류밀도 값을 향상시킨 것으로 사료된다. 최종적으로 초전도체에 직접 전류를 흘림으로써 우수한 임계전류밀도 값을 얻은 결과는 초기조성으로 합성, 제조한 희토류 원소인 Sm과 Nd가 Y site로 치환되는 것에 기인한다고 볼 수 있으며 이와 병행해서 최적조건의 존멜팅법을 이용해 용융성장 시킨 제조공정을 통해 우수한 (YSN)1.8 초전도체 특성을 얻을 수 있었으리라 사료된다.

4. 결 론

임계전류특성을 향상시킬 목적으로 기존의 YBCO계

고온초전도체에 희토류 원소인 Sm과 Nd를 치환시켜 (YSN)1.8계 고온초전도체를 합성하였다. 합성된 (YSN)1.8 조성의 초전도체 분말은 미세화 과정을 거친 후 고무몰드를 이용해 600 MPa 이상의 압력으로 원통형 길이모양으로 CIP성형하였다. 이렇게 얻은 원통형상의 (YSN)1.8 성형체는 존멜팅법을 이용해 용융온도 1100°C의 hot zone 온도에서 시간당 3.5 mm의 성장속도로 최적화되어 용융성장 되었다. 용융성장된 (YSN)1.8 고온초전도체는 X-ray를 통해 결정성을 평가하였으며 그 결과 c-축으로 일방향 고르게 성장된 특성을 확인할 수 있었다. 광학현미경 미세구조 관측결과 irregular한 211 inclusions의 모습이 123 matrix 내에 균질하게 성장된 모습이 관측되었고 TEM에 의한 미세구조 관측결과 원형상의 211 inclusions과 함께 쌍정의 모습을 확인할 수 있었다. 초전도특성을 측정한 결과로는 (YSN)1.8 초전도체에 미량의 CeO_2 를 첨가한 시편의 특성이 우수하게 나타났으며 임계온도의 경우 90 K 이상의 우수한 특성을 보이고 있었으며 4단자법을 이용해 직접전류수송법에 의한 측정결과 수송전류 830 A에서 $39,300(\text{A}/\text{cm}^2)$ 의 값을 보이는 우수한 임계전류특성을 얻었다. 이 같은 결과는 향후 전개될 벌크 및 선재형 고온초전도체 응용분야에 그 실용화가 가능하리라 예견된다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] S.I. Yoo, N. Sakai, H. Takaichi and M. Murakami, "Melt processing for obtaining $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ superconductors with high T_c and large J_c ", Appl. Phys. Lett. 65 (1994) 633.
- [2] M. Nakamura, C. Krauns and Y. Shiohara, "Fabrication of single crystal of $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ by the modified top-seeded solution growth method in low oxygen partial pressure atmosphere", Jpn. J. Appl. Phys. 34 (1995) 6031.
- [3] M. Murakami, N. Sakai, T. Higuchi and S. I. Yoo, "Melt-processed light rare earth element-Ba-Cu-O", Supercond. Sci. Technol. 9 (1996) 1015.
- [4] S. Jin, T. Tiesel, R. Sherwood, R. van Dover, M. Davis, G. Kammlott and R. Fastnacht, "High critical current in Y-Ba-Cu-O superconductors", Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 2074.
- [5] P. McGinn, W. Chen, N. Zhu, M. Lanagan and U. Balachandran, "Microstructure and critical current density of zone melt textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ", Appl. Phys. Lett. 57(14) (1990) 1455.

- [6] S.J. Kim and H.G. Kim, "Effects of 211 inclusions on zone melt-textured (RE/Y)-Ba-Cu-O superconductors", *Physica C* 338 (2000) 110.
- [7] D. Shi, H. Krishnan, J.M. Hong and D. Miller, "Transport critical current density and microstructure in extruded $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ wires processed by zone melting", *J. Appl. Phys.* 68 (1990) 228.
- [8] F. Giovannelli, S. Marinell and I. Monot-Laffez, "Melt processing of (right rare earth) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ materials by the floating zone method", *Supercond. Sci. Technol.* 15 (2002) 533.
- [9] Y. Nakamura, T. Misu, Y. Ooishi, R. Inada and A. Oota, "Fabrication and transport current properties of directionally solidified Y123 thin fiber", *IEEE Trans. on Applied Supercond.* 15(2) (2005) 3165.
- [10] S.J. Kim, "Effect of 211 inclusions in directionally melt-textured $(\text{Y}_{0.5}\text{Sm}_{0.25}\text{Nd}_{0.25})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ oxides", *J. of Ceramic Processing Research* 7(3) (2006) 235.
- [11] S.J. Kim, "Crystal growth and pinning enhancement of directionally melt-textured $(\text{Y}_{0.5}\text{Nd}_{0.25}\text{Sm}_{0.25})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ oxides in air", *J. of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* 15(5) (2005) 188.
- [12] S.J. Kim, K.W. Lee and H.G. Kim, "Characterization and superconducting properties of (Sm/Y)-Ba-Cu-O composite oxides by top-seeded melt growth in air", *J. Crystal Growth* 204 (1999) 78.
- [13] C.J. Kim, H.W. Park, K.B. Kim and G.W. Hong, "New method of producing fine Y_2BaCuO_5 in the melt-textured Y-Ba-Cu-O system: attrition milling of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ - Y_2BaCuO_5 powder and CeO_2 addition prior to melting", *Supercond. Sci. Technol.* 8 (1995) 652.
- [14] R. Cloots, T. Koutzarova, J.P. Mathieu and M. Ausloots, "From RE-211 to RE-123. How to control the final microstructure of superconducting single domains", *Supercond. Sci. Technol.* 18 (2005) R59.
- [15] J.W. Cochrane, P.A. Miles, G.J. Russell, G. Foran and D.J. Cookson, "Electron microprobe analysis and synchrotron diffraction study of crystalline $(\text{Nd}_{0.5}\text{Y}_{0.5})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ ", *Physica C* 277 (1997) 213.
- [16] S.J. Kim, "Flux pinning enhancement and irreversibility line of Sm doped YBCO superconductor by zone melt growth process", *Transactions on Electrical and Electronic Materials* 5(2) (2004) 81.
- [17] M.P. Delamare, M. Hervieu, J. Wang, J. Provot, I. Monot, K. Verbist and G. Van Tendeloo, "Combination of CeO_2 and PtO_2 doping for strong enhancement of J_c under magnetic field in melt-textured superconductor YBaCuO ", *Physica C* 262 (1996) 220.