

## YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> 고온초전도체 단결정에서의 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> 편석과 Multi-Seeding의 가능성, 대각선 흔적의 형성 원인

### Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> Segregation, a Possibility of Multi-Seeding and the Origin of Diagonal Line in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> Superconductor Single Crystal

한영희\*, 성태원\*, 한상철\*, 이준성\*, 지영아\*\*, 김찬중\*\*

Young-Hee Han\*, Tae-Hyun Sung\*, Sang-Chul Han\*, Jun-Sung Lee\*, Young A Jee\*\*, Chan-Joong Kim\*\*

**Abstract:** The microstructures of top seed melt processed YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> single crystal were studied. Although shape of the seed was not faceted, the growth shape of Y123 single crystal was faceted. It was observed that Y211 phases were trapped in specific spaces of the faceted region. From the microstructural investigation, it was suggested that the segregation of Y211 is due to the difference of growth rates in crystal direction.

When a single crystal was grown by the single seed with stepped multi surfaces, a microstructure was seemed like that one single crystal was grown from multi-seed. The microstructure show the possibility of multi-seed growth.

Corn kernel like structure without Y211 phase was observed and seemed to be formed by the diffusion reaction between Y211 phase in crystal and liquid wetted on the crystal. At the near corner of the seed crystal, the diagonal line on Y123 crystal was observed that it was formed by the corn kernel like structure.

**Key Words:** YBCO, single crystal, melt-process, Y211 segregation, diagonal line, multi-seeding

## 1. 서 론

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub> (Y123) 고온초전도체 단결정은 강력한 자기적 성질을 가지고 있어 자기부상 및 에너지 저장용 플라이휠 등의 용도에 사용이 기대되고 있다 [1,2].

Y123 단결정을 성장시키는 방법의 하나로 종자결정

을 사용하여 Fig. 1의 Y<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub> (Y211)과 액상이 공존하는 부분용융 상태의 영역에서 포정반응(peritectic reaction) 온도인 1010°C이하로 과냉각시켜 결정을 성장시키는 종자결정법이 있는데, 이 결정 성장 기구를 규명하기 위해 많은 연구가 수행되었다[3-6]. 이들에 따르면 Y123상을 형성하는 포정반응은 액상내에 분산된 Y211 입자와 성장하는 Y123 계면 사이의 조성차이로 인한 용질확산에 의해 진행된다고 알려져 있다[5,6].

Y211 상의 편석 현상에 대한 연구도 진행된 바 있다[7,8]. Y211상은 Y123 단결정에서 자기적 성질을 결정하는 요인인 고정점(pinning center)의 역할을 하여 Y211상의 크기가 작고, 고르게 분포할수록 임계 전류밀도(Jc) 및 자기적 성질이 좋아지는 것으로 알려져 있다. 그런데 Y211 상의 편석현상이 일어나면 결정의 c축에 수직한 방향으로 Y211상이 적어지기 때문에 Jc 및 자기적 성질이 저하된다.

본 논문에서는 Y211 상이 다량으로 함유된 Y123 단결정의 미세구조를 관찰하여 초전도 특성을 좌우하는 Y211상의 분포에 대한 해석과 이를 해결할 방법을 모색하였다.

또한 여러 개의 종자를 사용하여 하나의 결정을 성장시킬 수 있는 가능성을 탐색하고, 종자결정법으로 성장시킨 단결정의 표면에 항상 나타나는 대각선의 흔적에 대한 원인에 대하여 고찰하였다.

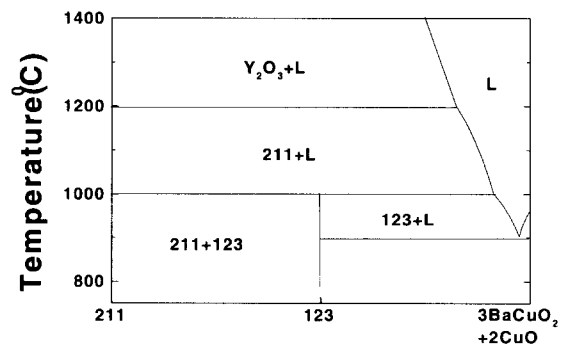


그림 1. Y-Ba-Cu-O 계의 상태도.

Fig. 1. Phase Diagram of Y-Ba-Cu-O system.

\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원

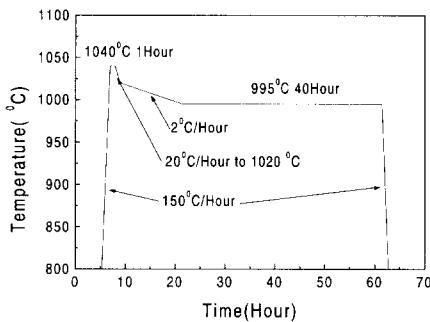
\*\* 비 회 원 : 한국원자력연구소

원고접수 : 1999년 3월 09일

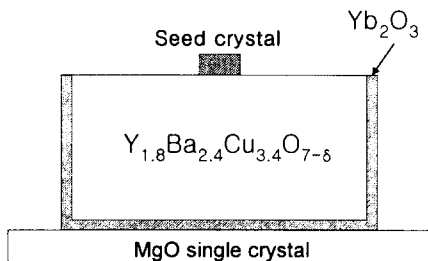
심사완료 : 1999년 4월 19일

## 2. 실험방법

분말은  $Y_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-\delta}$  (Y1.8)로 Y123:Y211의 몰비가 1:0.4인 조성으로 제조한 것을 사용하였다. 분말을 1000kgf/cm<sup>2</sup>의 압력으로 성형하여 25×25×10 mm 크기의 성형체를 만들었다. 이 성형체를 추가적인 핵 형성을 억제하기 위하여 Fig. 2의 (b)와 같이 밑면과 옆면을  $Yb_2O_3$  페이스트를 도포하고, MgO 단결정 위에 올려놓았다. 성형체 위에 한국원자력 연구소에서 제조한 2×2×1 mm<sup>3</sup> 크기 이상의  $Sm_{1.8}Ba_{2.4}Cu_{3.4}O_{7-\delta}$  (Sm1.8) 종자결정을 성형체의 상면과 종자결정의 c축이 수직하도록 올려놓은 후 Fig. 2 (a)와 같은 열처리 공정으로 사각 형태의 로 내에서 결정을 성장 시켰다. 이렇게 성장시킨 단결정 시편에서 종자결정을 제거하고, 광학현미경으로 표면부와 내부의 미세구조를 관찰하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) 열처리 스케줄, (b) 종자결정 성장에서 샘플의 모식도.

Fig. 2. (a) Schedule of heat treatment, (b) schematic diagram of sample in top seed melt growth.

## 3. 실험결과

### 3.1. 각진 형상을 이루는 과정에서 Y211 상의 포획

Fig. 3은 성장시킨 Y123 단결정 시편에서 종자결정을 떼어낸 후의 종자결정이 있던 부분의 표면 미세구조로, 종자결정(S)의 모양이 상당히 불규칙한 상태이었음에도 불구하고, 성장한 Y123 단결정은 각진 형상(F)을 이루며 성장하였음을 알 수 있다.

일반적인 포정반응의 경우 계면반응 혹은 확산반응이 전체반응 속도를 좌우하는데, Y-Ba-Cu-O 계에서 Y211+L 영역으로부터 Y211+Y123 영역으로의 포정반응(peritectic reaction)은 계면반응이 전체반응 속도를 결정하는 것으로 알려져 있다.

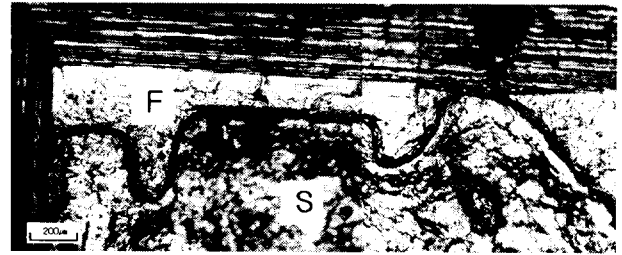


그림 3. 불규칙한 모양의 종자(S)로부터 각진 모양으로 성장하는 결정(F)을 보여주는 표면이미지.

Fig. 3. Surface image showing that faceted crystal(F) was grown from non-faceted seed (S).

계면반응이 전체반응 속도를 결정하는 경우에는 결정의 성장모양은 다음과 같은 Jackson factor :  $\alpha$ 에 의하여 결정된다.

$$\alpha = \xi \left( \frac{L}{kT_f} \right)$$

여기서  $\xi$ 는 결정학적 이방성에 의한 상수로 1보다 작은 값이고, L은 latent heat를 나타내며, k는 볼츠만 상수이고,  $T_f$ 는 포정반응 온도를 나타낸다.

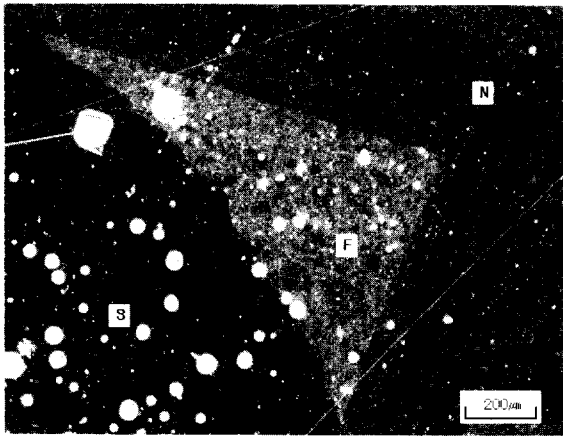
Jackson factor 값은 Y123 단결정에서는 약 20으로 [9] 각진 형상(faceted)과 불규칙 형상(non-faceted)을 결정하는 경계값인 2보다 커 각진 형상(faceted)을 이루려는 경향이 매우 크기 때문에, 성장 초기에 종자를 모두 포함하는 각진 형상을 먼저 형성하고 이 형상을 유지하면서 단결정이 성장한 것이다.

Fig. 4 (a), (b)는 각진 형상을 이루며 성장한 부위를 관찰하기 위하여, 성장시킨 Y123 단결정의 표면을 연마하여 광학현미경에서 어둠모드(dark field)로 종자결정이 있던 부분을 관찰한 것이다. 이 사진에서 밝기의 차이는 주로 Y211 상의 농도와 관련된 것으로 Y211 상이 많은 부분은 밝게 보이고, Y211 상이 적은 부분은 어둡게 보인다. 왼쪽의 검은 부분은(S)이 종자와 접촉했던 부분으로 어둡게 보여 Y211 상이 적음을 알 수 있고, 종자의 초기형상을 그대로 따라 약간 둥근 형상이었다. 995°C에서 성장한 부분(N)은 비교적 밝게 보여 Y211 상이 많이 존재함을 알 수 있다. 여기서 특이한 것은 각진 형상을 유지하기 위하여 성장한 F 영역은 정상 성장한 N 영역에 비해서도 비정상적으로 밝은 것이다. 즉, Y211 상이 과다하게 존재하는 것이다.

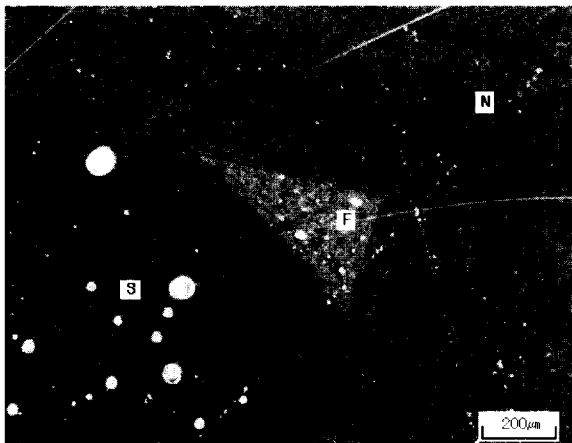
Y123 단결정 내에서의 이러한 Y211 상의 분포 현상을 해석하려는 여러 연구들이 진행되었고, 모델적인 연구들이 많이 이루어져 있다 [10,11,12]. 이 연구 결과들에 따르면 Y123 결정은 이방성이 커서 c축에 수직인 면에서는 포획(trap)되는 Y211 상의 수가 적고, a나 b 축에 수직인 면에서는 Y211 상이 많이 포획되는 것으로 설명되고 있다. 그러므로 종자의 c축을 성형체의 윗면에 수직하도록 사용하는 경우에는 Fig. 5와 같이 Y211 상이 분포할 것으로 예측되었고, Fig. 4 (a),(b)에서는 이러한 형상을 확실히 보여주고 있다.

그러나, 이러한 이론들에 따르면 Fig. 4 (a)의 F 영역은 S 영역과 마찬가지로 Y211 상이 적어야 되는 부위임에도 불구하고 N 영역에 비해서 Y211 상이 더 많아 매우 밝게 보였다. 또한 종자가 있었던 밑 부분에서는 성형체 내부에 존재하던 가스의 확산이 종자에

의해 방해받기 때문에 다른 부위(N)에 비하여 다수의 큰 기공들이 존재하는 것을 알 수 있는데, 종자가 덮고 있지 않았던 영역인 F영역에서도 다수의 기공이 관찰되었다. 이것은 F영역의 성장속도가 기공이 포획될 정도로 매우 빨랐다는 것을 말해 주는 현상으로 이러한 빠른 성장속도에 의하여 Y211 상이 포획된 것으로 생각된다. 이러한 가정으로부터 현재까지 Y123 결정의 이방성에 의해 설명되어 왔던 Y211 상의 편석 현상이 각각의 결정면 성장속도의 차이에 의한 현상으로 설명 가능할 것으로 판단된다. Fig. 4 (b)는 (a)의 시편을 다시 연마하여 동일한 부분을 찍은 사진으로 각진 형상을 이루기 위한 F 영역이 결정 밑으로 내려갈수록 점차로 줄어들고 있음을 보여 준다.



(a)



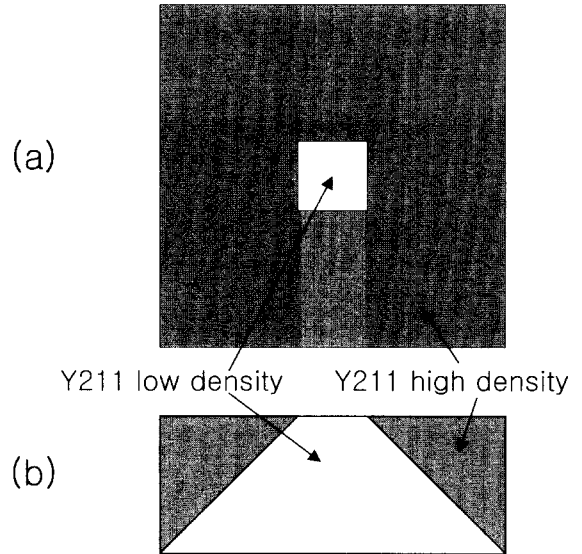
(b)

**그림 4.** (a) Y123 단결정의 성장모양을 보여주는 연마된 표면의 광학 사진. (b) 샘플 (a)를 약간 연마한 후의 이미지. S,F,N은 각각 종자, 각진입자성장 그리고 정상입자성장 부위를 나타낸 것임.

**Fig. 4.** (a) dark field image of polished Y123 single crystal showing growth shape of the crystal. (b) image is the underneath of sample (a). S,F,N denote respectively seed, faceted, normal growth region.

제II종 초전도체인 Y123 단결정에서 자력선의 고정점 역할을 하는 Y211 상은 최대한 고르게 분포하는 것이 자기적 물성을 가장 좋게 하는 방법인데, Fig. 5 (a), (b)와 같이 중앙 부분에 Y211 상이 거의 존재

하지 않으면, 자력선의 고정점이 없어 자기적 물성은 크게 저하된다. 그러므로 Y211 상의 편석현상은 바람직하지 않은 것으로, Fig. 4 (a),(b)와 같이 불규칙한 모양의 종자를 사용하였을 때, 각진 형상을 유지하기 위하여 빠르게 성장하는 영역에는 Y211 상이 포획



**그림 5.** Y123 단결정에서 (a) c축 수직면과 (b) a 또는 b축 수직면 상의 Y211 분포를 나타내는 모식도.

**Fig. 5.** Schematic diagram of Y211 distribution model in (a) c-normal plan, (b) a or b-normal plan of Y123 single crystal.

되는 현상을 이용할 수 있다면 Y123 단결정의 자기적 성질을 크게 개선할 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.2. Multi-seeding의 가능성

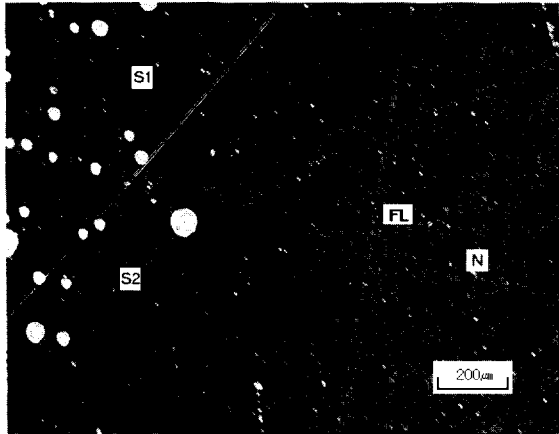
TSMG(top seeded melt growth) 법으로 Y123 단결정을 성장시키는 공정은 성장속도가 1mm/hr 이하로 매우 느리기 때문에 이 시간을 줄이기 위해 여러 개의 종자(multi-seeding)를 이용하려는 노력들이 진행되어 왔으나, 결정과 결정사이에 항상 소량의 액상이 잔존하기 때문에 하나의 결정을 만들었다는 보고는 현재까지 없었다.

Fig. 6 (a)는 하나의 종자를 사용하여 성장시킨 단결정의 종자결정 부위의 표면 연마면 사진인데, 매우 근접한 두 개의 종자(S1,S2)로부터 하나의 단결정이 성장한 것과 같은 미세구조를 보이고 있다. FL로 표시된 흰색의 혼석은 Y123 단결정을 성장시키기 위하여 995℃로 과냉각시키는 과정 중에 성장한 영역과 995℃에서 성장한 영역의 경계선으로 하나의 결정으로 되어 있음을 쉽게 알 수 있다. 두 개의 종자들 사이에서 Y211 상의 분포는 995℃에서 성장한 N영역의 분포와 크게 다르지 않으나, N영역과는 다르게 기공이 포획되어 있음을 알 수 있다.

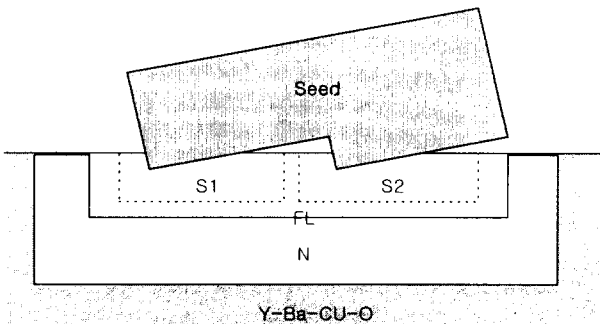
이러한 미세구조는 Fig. 6 (b)의 모식도와 같이 종자의 결정면이 단을 이루고 있었던 경우로 설명이 가능할 것으로 보인다. 종자결정은 보통 벽계 면으로 쉽게 쪼개지는 성질을 이용하여 자르게 되는데, 하나의 벽계 면으로 잘라지지 않고 단이 형성되면 두 개의 면이 존재하게 되는데, Fig. 6 (b)와 같이 각각의 종자면이 성형체와 접촉하면 결정방위가 동일한 두 개의 종자로 작용하여, 초기에는 각각 다른 결정으로 성장

하며 그 사이에서 Y211 상은 N영역과 비슷한 분포를 나타낸다. 이러한 상황에서 결정성장이 더 진행되어 두 개의 결정이 접촉하게 되면서 하나의 단결정으로 성장한 것이다.

이러한 미세구조는 두 개의 종자 결정의 방위가 동일하고, 종자결정 사이가 가까워야하고, 과냉각이 적은 아주 제한적인 상황에서 나타난 것이기는 하지만, 여러 개의 종자를 이용하여서도 하나의 단결정을 성장시킬 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 6. (a) 두 개의 종자로부터 성장한 결정이 한 개로 합쳐진 것을 보여주는 사진. (b) 계단 형태의 표면을 갖는 종자가 단결정으로 성장하는 것을 보여주는 모식도.

Fig. 6. (a) a polished image was seemed like that one single crystal was grown from multi-seed. (b) schematic diagram showing that one Y123 single crystal was grown by the single seed with stepped multi surfaces.

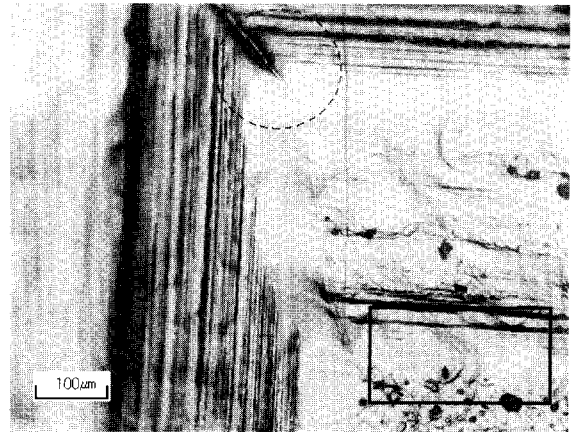
### 3.3. Y211 확산반응에 의한 Y123 단결정의 성장

Fig. 7 (a)는 성장시킨 Y123 단결정의 종자결정이 있던 자리의 표면 미세 구조로 원으로 표시한 모서리에 오목하게 들어간 흔적이 있음을 알 수 있다.

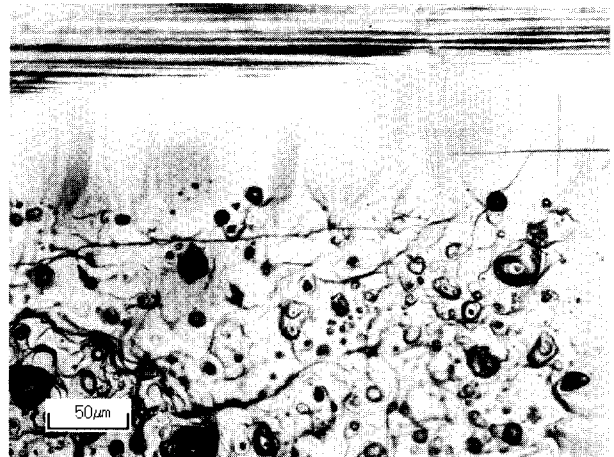
Fig. 7 (b)는 (a)의 사각으로 표시한 부분을 확대한 미세구조로 안쪽에 Y211 상들이 많이 포함되어 있는 Y123 단결정이 있고 그 바깥쪽으로 "옥수수 알"과 같은 형상의 Y211 상이 전혀 없는 Y123 단결정이 성장하였음을 볼 수 있다. 또한 이 Y211 상이 없는

영역의 성장형상은 내부의 Y211 상으로부터 시작한 듯하게 보이는 흔적을 가지고 있다. Fig. 7 (a)에서의 오목한 부분은 이러한 "옥수수 알"과 같이 성장한 부분이 만나 형성된 것을 알 수 있다.

Y1.8 성형체를 Y211+L 영역으로 부분 용융시킬 때 형성된 액상은, Y123 단결정과 접촉각이 낮기 때문에 [13] 표면장력에 의하여, 결정의 주변으로 쫓겨 올라온다. 이때 유동성이 적은 Y211 상은 거의 없는 상태일 것이다. Y123 결정의 성장이 진행되는 동안,



(a)



(b)

그림 7. (a) 대각선의 시작점(점원부위)과 (b) (a)의 사각표시 지역을 확대한 옥수수 알 모양의 성장부위를 보여주는 광학 사진.

Fig. 7. Optical micrograph on the surface of Y123 single crystal showing (a) start point of diagonal line (circle), (b) "corn kernel" like crystal (magnification of quadrangle in (a)).

이 액상들은 성장한 Y123 단결정의 표면에 남아 Y123 단결정 내에 존재하는 Y211에서 확산하여 나오는 Y 성분과 반응하여 Fig. 7 (a)에서 보는 것과 같이 Y211 상이 전혀 없는 "옥수수 알"과 같은 형상으로 성장할 수 있을 것이다. "옥수수 알"과 같은 형상의 끝에 Y211 상들이 존재하는 것이 이러한 설명을 타당성 있게 해 준다. 이러한 현상은 성형체내에 존재하던 기공으로 액상이 몰려서 형성된 "Y211 free region" 과 같이 설명할 수 있다 [13]. 또한 Y211 상

에서 모서리 부분까지의 확산거리는 상대적으로 멀기 때문에 모서리에서의 성장은 상대적으로 어렵게 되므로 Fig. 7 (a)와 같이 오목하게 들어간 형상이 될 수 있을 것이다.

결과적으로 이 오목한 형상은 성장한 Y123 단결정에는 종자결정의 모서리에서부터 대각선 방향으로 보이게 된다. 그러나 이러한 오목한 부분은 표면장력으로 액상이 올라올 수 있는 종자결정 주위로부터 멀어지면 없어지고, Y123 단결정 표면 위의 대각선 모양은 Fig. 8 과 같이 표면상태의 차이에 의한 것으로 보인다. 그러므로 종자 결정으로부터 먼 부분

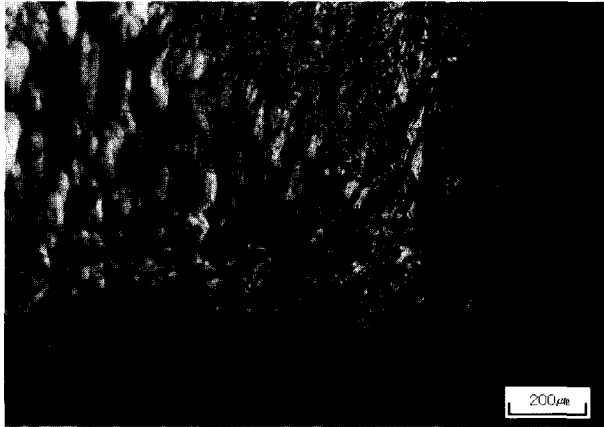


그림 8. Y123 단결정의 코너에서는 더 이상 대각선이 오목하지 않다는 것을 보여주는 광학사진.

Fig. 8. Optical micrograph showing that the diagonal line is no more concave at the corner of Y123 single crystal.

에서의 대각선의 흔적에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

종자 결정법으로 Y123 단결정을 성장시켜 미세구조를 관찰함으로써 다음과 같은 사실을 발견하였다.

성형체와 접촉하는 종자 결정의 면이 불규칙한 형상이어도 성장하는 Y123 단결정은 초기에 접촉면을 모두 포함하는 정사각형을 형성하고 그 형상을 유지하면서 성장하는데, 정사각형을 형성하기 위해 성장한 영역에서는 Y211상과 기공이 다량 함유되어 있는 현상을 관찰하였으며, 이러한 현상으로부터 Y211의 편석 현상이 결정면들 간의 성장속도 차이에 의한 것으로 해석된다. 또, 이 현상은 Y211 상의 편석 문제를 해결할 실마리를 제공한다.

단을 이루고 있는 종자를 사용한 시편에서, 두 개의 종자로부터 하나의 Y123 단결정이 성장한 것과 같이 보이는 미세구조를 관찰하고, 이에 대한 해석을 하였다. 또한 여러 개의 종자를 사용하여 하나의 결정을 성장시킬 수도 있다는 가능성을 보였다.

표면장력에 의해 종자결정 주변으로 쫓겨 올라온 액상과 Y123 단결정 내부에 존재하는 Y211 상 중의 Y 이 확산반응하여 Y211상이 전혀 없는 Y123 단결정이 옥수수 알과 같은 형태로 종자결정의 주위에서 성장한 것을 발견하였다. 또한 이에 의하여 종자결정의 주변에서는 모서리로부터 대각선으로 오목한 흔적이 관찰되었으며, 이것이 성장시킨 Y123 단결정의 표면

부에 항상 관찰되는 대각선의 흔적의 시작임을 밝혔다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Francis C. Moon, "Superconducting levitation: applications to bearings and magnetic transportation". John Wiley & Sons, Inc., Chapter 2, 1994
- [2] Z. J. Yang, "Levitation force on a permanent magnet over a superconducting plane: modified critical-state model", *J. Supercond.*, Vol. 10, pp:137, 1997
- [3] T. Izumi, Y. Nakamura, and Y. Shiohara, "Diffusion solidification model on Y-system superconductors," *J. Mater. Res.* Vol. 7, pp:1621, 1992.
- [4] Y. Nakamura and Y. Shiohara, "Peritectic solidification model for Y-system superconductive oxides," *J. Mater. Res.* Vol. 11, No. 10, pp:2450, 1996.
- [5] M. J. Cima, M. C. Flemings, A. M. Figuredo, M. Nakade, H. Ishii, H. D. Brody, and J. S. Haggerty, "Semisolid solidification of high temperature superconducting oxides," *J. Appl. Phys.* Vol. 72, pp:170, 1992.
- [6] C. A. Bateman, L. Zhang, H. M. Chan, and M. P. Harman, "Mechanism for the peritectic reaction and growth of aligned grains in  $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ ," *J. Am. Ceram. Soc.* Vol. 75, No. 5, pp:1281-1283, 1992.
- [7] U. Balachandran, W. Zhong, C. A. Youngdahl and R. B. Poeppel, "Microstructure and associated properties of YBCO superconductors prepared by melt-processing," *J. Electronic Mater.* Vol. 22, No. 10, pp:1285, 1993.
- [8] C. Varanasi, P. J. McGinn, "The effect of  $PtO_2$  additions on the  $Y_2BaCuO_5$  morphology in melt textured  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ," *Physica C* 207, (1993) 79.
- [9] M. Nakamura, Ch. Krauns and Y. Shiohara, "Oxygen partial pressure dependence of the yttrium solubility in Y-Ba-Cu-O solution," *J. Mater. Res.*, Vol. 11, No. 5, pp:1076-1081, 1996.
- [10] Jee Y. A, Kang S-J and Jung H-S, "Formation mechanism of  $Y_2BaCuO_5$  pattern in growing  $YBa_2Cu_3O_x$  grains during melt-infiltration process," *J. Mater. Res.*, Vol. 13, No. 3, pp:583-588, 1998.
- [11] Kim C-J, Kim K-B, Kim I-H and Hong G-W, "Influence of the cooling rate, the particle size and the fraction of  $Y_2BaCuO_5$  on its segregation mode within melt-textured  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  crystals," *J. Mater. Res.*, Vol. 13, pp:269, 1998.
- [12] S. Honjo, et. al., "Seeded crystal growth of  $YBa_2CuO$  in semi-solids melts," *J. Mater. Res.*, Vol. 12, No. 4., pp:880-890, 1997.

- [13] Chan-Joong Kim and Gye-Won Hong, "Defect formation, distribution and size reduction of  $Y_2BaCuO_5$  in melt-processed YBCO superconductors," Supercond. Sci. Technol., Vol. 12, pp:R27-41, 1999.

## 저자 소개



### 한영희(韓榮熙)

1965년 8월 1일 생, 1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동 대학원 무기재료학과 졸업(공학석사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.



### 성태현(成台鉉)

1959년 10월 9일 생, 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사), 1991-92년 ISTEK 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc., 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.



### 한상철(韓相哲)

1966년 3월 26일 생, 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.



### 이준성(李峻誠)

1972년 2월 14일 생, 1995년 포항공과대학교 물리학과 졸업, 1997년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 한국전력공사 전력연구원 일반연구원.



### 지영아(池映娥)

1969년 2월 20일 생, 1991년 한국과학기술원 재료공학과 졸업, 1993년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학석사), 1993년 동 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한국원자력연구소 위촉연구원.



### 김찬중(金瓚中)

1958년 10월 26일 생, 1983년 성균관대학교 금속공학과 졸업, 1986년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학석사), 1990년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(공학박사), 1993년 Univ. of Notre Dame Post Doc., 현재 한국원자력연구소 책임연구원.