

## 수정된 열교환법에 의한 sapphire 단결정의 성장 : I. 사각단면 단결정의 제조

이민상, 김성균\*, 김동익\*, 진영철

전북대학교 금속공학과, 전주, 561-756

\*군산대학교 재료공학과, 군산, 573-701

## Sapphire single crystal growth by the modified heat exchanger method : I. Preparation with the square cross-section

Min-Sang Lee, Seong-Gyoon Kim\*, Dong-Ik Kim\* and Young-Chul Jin

*Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University, Chonju 561-756, Korea*

*\*Department of Materials Science and Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701, Korea*

요 약 본 연구에서는 냉각매체로서 물을 이용하는 수정된 열교환법을 이용하여  $45 \times 45 \times 20$  (mm) 크기의 사각단면 형상의 sapphire 단결정의 제조가능 조건에 대하여 조사하였다. 온도에 따른 성장로 내의 압력 변화로부터 사파이어의 용융 및 응고 과정을 추적할 수 있었으며, 이로부터 sapphire 단결정은  $1970 \sim 1960^\circ\text{C}$ 에서 응고가 완료됨을 알 수 있었다. 도가니 성형시 이루어지는 '귀'의 형태는 도가니 벽면과 접촉되지 않는 '나선형태'이어야 한다. 열유출부는 용액 내의 온도구배를 지배하며 용액내의 열유속과 씨앗 결정의 흔적은 Mo 봉의 체적 변화로서 조절할 수 있었다. 기공 형성을 억제하기 위해서는  $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$  이하의 발열체의 냉각속도가 요구되었다.

Abstract In this study, we have investigated the preparation conditions of  $45 \times 45 \times 20$  (mm) square cross-section sapphire single crystal by the modified heat exchanger method using water as a coolant. Melting and solidification processes were optimized by the systematic change of the chamber pressure with the heater temperature. As a results, solidification temperature was

between 1960 and 1970°C. The crucible was formed by handling. Therefore its shape should had the 'spiral type' ear at edge of its side. Heat exchanger affected to the temperature distribution and gradient of molten alumina. Heat flux and unmelted seed were controlled by volume of heat exchanger. Voids were controlled by the cooling rate of the heater below 0.2°C/min.

## 1. 서 론

sapphire는 rhombohedral 구조를 갖는  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 단결정으로서, 1892년 A.Verneuil 등에 의해  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 이 불순물로 포함된 rubby가 상업적 수준에서 성공적으로 제조된 이후 [1] 광학적, 열적, 기계적 성질이 우수하기 때문에 우주, 군사용 광학시스템, 레이더, 고압기 부품, 내마모 재료[2]와 반도체 기판, 특히 청색 LED용 기판 재료로서 응용되고 있으며[3,4] 양질의 고품위 단결정이 요구되어지고 있다. 현재까지 알려진 결정성장 방법중 낮은 전위밀도의 단결정으로 성장시킬 수 있는 방법은 Czochralski(CZ)법과 열교환법(HEM)의 두 가지가 유망한 것으로 보인다. 전위밀도를 낮추기 위해서는  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 이나  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  방향으로 결정을 성장시켜야 하나[5], 청색 LED용 기판으로는 basal plane이 주로 이용되기 때문에[6,7] 단결정으로부터 wafer형태의 기판을 가공하는데 있어서는 두 방법 모두 수율에 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 wafer 가공시의 수율을 고려하여 Fig. 1과 같이 사각단면을 design하였다. Fig. 1의 (a)와 같이 성장 방향을  $\langle 0001 \rangle$ 방향으로 성장시킨다면 수율은 우수할 것이다. 그러나 이 방향으로 성장시키면 내부 결함이 크게 증가되기 때문에 (b)와 같이  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 이나  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  방향으로 성장시켜야 하지만, 이 경우에는 (0001)면의 wafer를 얻는 수율이 떨어진다. 그러므로 (c)와 같이  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 이나  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$

방향을 성장방향으로 하고, 동시에  $\langle 0001 \rangle$  방향을 도가니의 옆면과 직교하도록 씨앗 결정을 배향시키면, 성장 후 사각단면을 갖는 결정의 옆면 중에서 두면이 (0001)면과 일치하게 된다. 이렇게 성장된 결정을 (0001)면과 평행하게 절단하면 수율이 우수하고 크기가 일정한 기판을 얻을 수 있다. 그러나 결정의 종류를 막론하고 사각단면의 단결정을 제조한 예는 극히 드물다. 사각단면의 단결정을 성장시키는 것은, 도가니나 씨앗 결정에 회전을 주지 않는 경우에만 가능하기 때문에 HEM이 가장 유망하리라 여겨진다. 또한 Si 및 Cu 단결정의 성장[8,9]에서와 같이, 냉각 매체로서 고가의 He gas 대신 물을 사용한 수정된 HEM을 이용할 수 있다면 고품질의 sapphire 단결정을 제조하는데 있어서 HEM의 효용성이 더욱 커질 것이다.

본 연구에서는 HEM에서 냉각 매체를 He gas 대신 물로 대체하였을 때, sapphire 단결정의 제조가 기본적으로 가능한지의 여부를 확인하고자 하였으며,  $45 \times 45 \times 20$  (mm)의 크기의 sapphire 단결정을 사각단면을 갖도록 성장시킬 수 있는 결정 성장 조건 및 노의 세부 구조 조건을 확립하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 단결정 성장장치는 Fig. 2와 같으며, 그의 구성은 결정성장로, 온도편차를  $\pm 1.0^\circ\text{C}$  이내가 되도록 제어하는

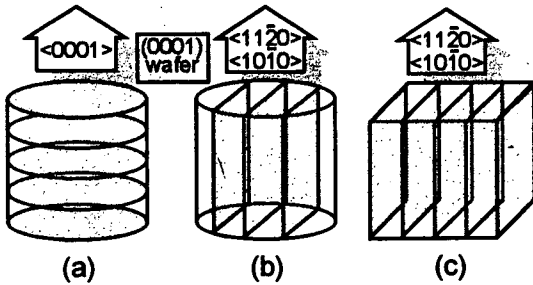


Fig. 1. Schematic diagram showing the cutting efficiency with the growth directions and crystal shapes. (a) Case of  $\langle 0001 \rangle$  growth direction with the circular cross-section, (b) case of  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  or  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  growth direction with the circular cross-section, (c) case of  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  or  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  growth direction with the square cross-section and two sides of crucible wall with (0001) planes.

온도제어부, 성장로내의 압력을 약 100 mtorr로 유지할 수 있는 진공펌프, 온도와 압력을 시간에 따라 기록하는 기록부와 단수 및 정전에 대한 안전장치로 이루어져 있다.

Sapphire 씨앗 결정의 (0001)면이 도가니의 한쪽면과 평행하도록 하여 도가니 바닥 중심부에 위치시키고 그 위에 sapphire scrap을 장입하였다. 성장된 결정이  $45 \times 45 \times 20$  (mm)의 크기가 되기 위한 장입량은 씨앗 결정을 포함하여 185~190 g이었다. 씨앗 결정과 scrap은 (주)남성세라믹에서 A.Verneuil법으로 제조한 결정을 이용하였다.  $45 \times 45$  (mm)의 사각단면을 갖는 도가니는 판상의 Mo(molybdenum)을 이용하여 가장 간단한 방법인 수작업으로 접어서 성형하였기 때문에, 도가니의 모서리에는 항상 '귀'(ear)모양이 형성되는데 이 형태를 'parallel

type'과 'spiral type'으로 변화시켜 '귀'의 영향을 조사하였다. 또한 도가니의 두께를 0.1~0.5 mm로 변화시켜 결정의 형상변화에 대하여 조사하였다. 본 연구에서와 같이 냉각 매체로서 물을 사용하는 경우에 열교환을 시켜주는 Mo 봉이 결정내의 온도구배를 지배하기 때문에 Mo 봉의 단면적과 체적을 Fig. 3과 같이 변화시켜 열유출부의 형상이 결정의 품질에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

결정 성장 과정은 다음과 같다. 먼저 도가니에 씨앗 결정과 scrap을 장입하고 발열체의 온도를  $1000^\circ\text{C}$ 까지 상승시켜 20분 유지한 뒤  $2120 \sim 2170^\circ\text{C}$ 까지  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 발열체의 온도를 상승시켰다. 최고 가열 온도에서 30분 유지 후 발열체의 냉각속도에 의한 영향을 조사하기 위하여 냉각속도를 0.05, 0.1, 0.2,  $0.4^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 변화시켰다.

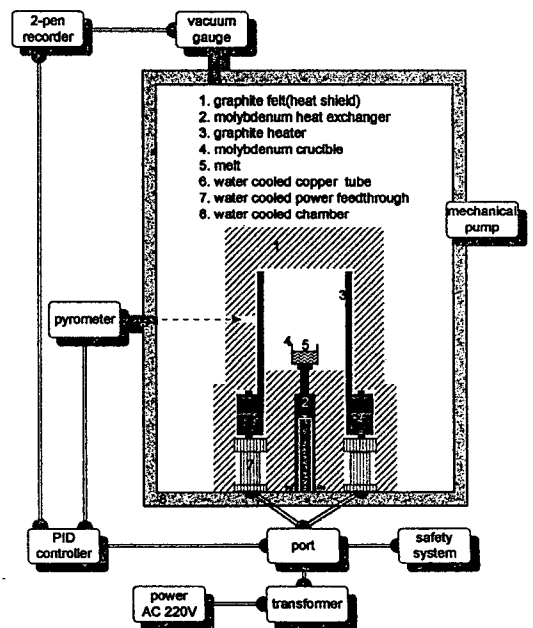


Fig. 2. Experimental apparatus for growth.

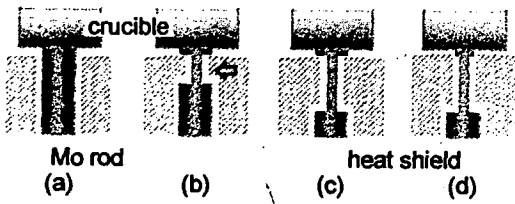
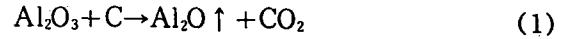


Fig. 3. Schematic diagrams of the molybdenum rod used as the heat sink material (a) without neck, (b)~(d) with neck. Dimension of Mo rods are (a)  $\Phi$  20 mm,  $l$  60 mm, (b) head of  $\Phi$  20 mm,  $l$  5 mm and neck of  $\Phi$  5 mm,  $l$  20 mm (c) head of  $\Phi$  20 mm,  $l$  5 mm and neck of  $\Phi$  5 mm,  $l$  40 mm, and (d) head of  $\Phi$  10 mm,  $l$  5 mm and neck of  $\Phi$  5 mm,  $l$  40 mm.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 용융 및 응고 과정의 추적

재료가 용융되거나 응고될 때 가스 방출의 증감에 따른 기압 변화가 발생하기 때문에 성장로 내의 압력 변화로부터 sapphire의 용융 또는 응고 과정을 추적할 수 있다. 이를 위해, 본 연구에서는 성장로의 진공 게이지의 출력 단자를 X-Y기록계에 연결하여 온도 변화에 따른 압력변화를 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. (a)는 다결정, (b)는 단결정으로 얻어진 경우에 나타난 내부 압력 변화이다. 1 peak는 1000°C까지 온도가 상승함에 따라 성장로 내의 수분을 포함한 기타의 불순물들의 증발에 의한 기압 변화로서 증발량이 감소함에 따라 압력이 낮아진다. sapphire의 용융점이 가까워짐에 따라 scrap 즉  $Al_2O_3$ 가 용융되면서 주위로부터 유입된 carbon과 식 (1)과 같이 반응[10]하여



가스가 방출되고 동시에 장입 재료에 함유되었던  $O_2$ 와  $H_2$  가스 방출로서 압력이 상승하여 2와 같은 peak가 형성된다. 용액이 차가운 열교환기 주위의 장입재료와 만나면 순간적으로 응고되어 고체로 되면서 증발량이 감소하여 압력의 감소를 보이다가 다시 용융되면서 3 peak가 나타난다. 냉각과정으로서 발열체의 온도가 낮아짐에 따라 열유출부 위에 위치한 씨앗 결정부터 응고되기 시작하게 되며, 용액이 액상에서 고상으로 변화함에 따라  $Al_2O$ 의 증발량은 점차 감소하게 되어 내부 압력이 떨어지게 된다. 그러나 응고 계면이 이동함에 따라 액상 내부에서 유동하고 있던  $Al_2O$ 가 결정의 표면으로 밀려 올라와 증발하게 되면 내부 압력이 증가하게 되므로, (b)의 4와 같은 변곡점이 나타나며 이때의 온도는 1970°C 부근이었다. 또한 결정 내의 액상량이 줄어들면 줄어들수록 액상 내에 유동하고 있던  $Al_2O$ 의 증발량도 줄어들게 되므로 내부 압력이 다시 감소하게 된다. 결정 성장이 완료되면 이  $Al_2O$ 가 더 이상 증발되지 않기 때문에 내부 압력이 감소하게 되므로 (b)의 5로 나타낸 변곡점을 형성하며 이때의 온도는 1960°C 부근이었다. 이후 계속 성장로 내의 온도가 낮아짐에 따라 내부 압력은 일정하게 감소하게 된다. 그러나 다결정이 형성된 (a)의 경우에는 4, 5와 같은 내부 압력의 변화점이 나타나지 않고 일정한 기울기로 내부 압력이 감소하다가 6과 같은 peak가 나타난다. 이는 결정이 응고될 때, 씨앗결정이 완전히 용유되어 씨앗 결정에서부터 응고가 일어나지 않고, 발열체가 냉각됨에 따라 결정의 표면에서부터 응고가 일어나던 중, 액상 내에 유동하고 있던  $Al_2O$ 가 과냉에 의하여 응고 계면을 따라 급속히

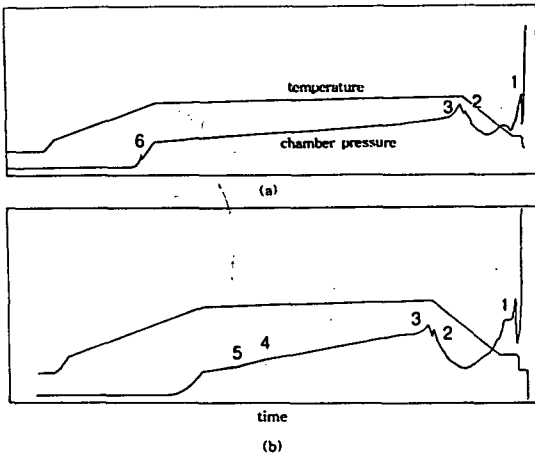


Fig. 4. Change of chamber pressure with the heater temperature in cases of (a) full melting and (b) partial melting of the seed crystal.

표면으로 밀려 올라와 증발됨으로서 내부 압력이 변하게 되기 때문으로 생각된다. 이러한 과냉에 의하여 다발적인 핵생성이 일어나 다결정이 형성되었다. 이상으로부터 sapphire 단결정은  $1970\sim 1960^{\circ}\text{C}$ 에서 응고가 완료됨을 알 수 있었으며, 이후에 또 다른 변곡점이나 peak가 형성된다면 다결정이 형성됨을 예측할 수 있었다.

### 3.2. 도가니가 결정의 형상에 미치는 영향

사각단면 형태를 갖을 수 있도록 도가니를 수작업으로 성형하였기 때문에 Fig. 5와 같이 도가니의 모서리에는 항상 '귀'모양이 생기게 된다. 이러한 '귀'의 형상에 따라서 결정의 형상이 변하게 된다. (a)는 도가니의 두께를  $0.1\text{ mm}$ 로 하고, 도가니를 성형할 때 이루어지는 '귀'의 형태를 parallel type으로 하여 발열체의 냉각속도를  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 제조한 결과로서 결정의 모양이 심하게 뒤틀

려 있다. (b)는 같은 두께의 도가니를 이용하여, 'spiral type'으로하여 도가니를 성형하고 같은 발열체의 냉각속도로 결정을 제조한 결과이다. 그러나 이 결정은 '귀'의 모양이 'spiral type'이 되도록 함으로서, 도가니 벽면쪽에서는 용액의 무게를 충분히 분산시켜 사각단면 형태를 유지하였지만, 도가니의 두께가 얇기 때문에 도가니 바닥쪽에서는 용액의 무게를 지탱하지 못하고 결정이 처져 있었으며, 화살표 A와 같이 '귀'가 이루어 질 때 도가니 벽면과 접촉하였기 때문에 모세관 현상에 의해 sapphire 용액이 도가니 밖으로 유출되게 되었다. 따라서 도가니를 성형할 때 이루어지는 '귀'의 형상은 화살표 B와 같이 도가니 벽면과 접촉되지 않게 하여야 함을 알 수 있었다. 따라서 (c)와 같이 두께  $0.3\text{ mm}$ 의 Mo 판을 이용하여 '귀'가 도가니의 벽면과 접촉하지 않도록하고 발열체의 냉각속도를  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로하여 제조한 결과 완전한 사각단면 형상의 결정을 얻을 수 있었다. 두께  $0.4\text{ mm}$  이상에서는 도가니를 수작업으로 성형중 균열이 발생하여 사용할 수 없었다.

### 3.3. 열유출부가 결정의 품질에 미치는 영향

발열체가 가열되면 복사, 대류 및 전도에 의한 열전달이 일어나게 되고, 발열체로부터 방사된 대부분의 열량은 도가니 벽과 용액 표면을 통하여 결정 내부로 유입되며 이들 유입된 열의 대부분은 열유출부 역할을 하는 Mo 봉을 통하여 수냉되는 Cu 봉 쪽으로 빠져나간다. 그러므로 도가니의 두께가 일정한 경우 Mo 봉의 디자인이 sapphire 결정내의 온도 분포와 온도 구배를 지배하여 결과적인 결정의 질에 영향을 미치게 된다. Fig. 6은 Fig. 3의 열유출부를 사용하였을 경우 열유

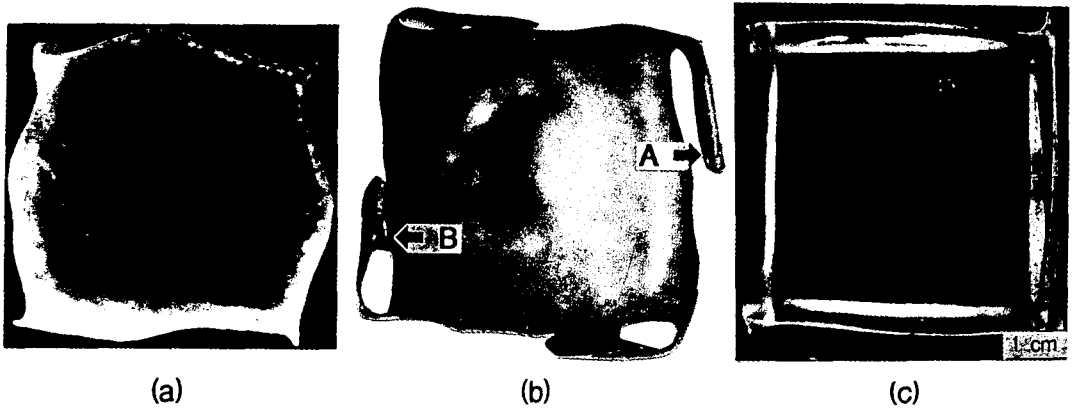


Fig. 5. Crucible shapes and the resulting sapphire crystal shapes. Cases of (a) parallel type, (b) spiral type (0.1 mm thickness), (c) spiral type (0.3 mm thickness).

출부의 형태에 따른 결정의 변화를 나타낸 것이다. (a)는 Fig. 3 (a)의 열유출부를 사용하여 2170°C까지 발열체를 가열하고, 발열체의 냉각속도 0.2°C/min로 결정을 성장시킨 결과이다. 사진중앙부위의 무늬는 결정성장 후 도가니와 결정을 분리할때 나타난 자국이다. 발열체를 2170°C까지 가열하였음에도 불구하고 씨앗 결정의 경계 부위가 용융되지 못한 채 남아 있으며, 사진의 화살표에서 볼 수 있듯이, 미용융 씨앗 결정 부분에서 균열이 발생되었다. 이러한 균열은 씨앗 결정의 표면이 용융되지 않는 한, 언제나 발생하였다. 따라서 균열 발생을 피하기 위해서는 씨앗 결정의 표면이 용융되는 온도까지 발열체의 온도를 증가시켜야 한다. 그러나 2170°C 이상의 온도로 발열체를 가열하는 경우에는 발열체의 수명에 문제가 되었다. 따라서 균열이 없는 결정을 얻기 위한 바람직한 방법은 발열체의 온도를 가능한 낮은 수준으로 유지하면서 열유출부를 통한 열유속을 감소시키는 것이다. 이러한 열유속을 감소시키기 위해서는, 열교환기로 유입되는 냉각 매체의 양을 조절할 수 있지만 본 실험에서는 냉각 매체로서 물을 사용하기 때문에 물의 양을

조절한다는 것은 사실상 많은 어려움이 따르게 된다. 그러므로 열유속을 조절하기 위한 유일한 방법은 열유출부의 체적을 감소시키는 것이다. 이를 위하여 Fig. 3 (b)의  $\leftarrow$ 와 같이 neck를 만들어 2170°C까지 발열체를 가열하고, 발열체의 냉각속도를 0.2°C/min로 했을 때 얻은 sapphire 결정을 Fig. 6의 (b)에 나타내었다. 이 경우에는, (a)와 비교하여, 씨앗 결정의 경계가 거의 나타나지 않은 것으로 보아 씨앗 결정의 표면이 거의 용융된 것으로 생각되며, Mo 봉의 체적을 감소시키므로써 열유속이 감소될 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 2170°C의 온도에서는  $Al_2O_3$ 의 증발량은 상대적으로 많게 되고 발열체나 단열재의 carbon과 반응하여 생성된  $Al_4C_3$ 량도 증가하게 되기 때문에, 발열체의 수명을 고려하면 발열체의 온도를 낮추어야 하는데, 발열체의 온도가 낮아지게 되면 씨앗 결정이 미용융 될 수 있다. 따라서 Fig. 3 (c)와 같이 neck의 길이를 더 길게하면, 열유출부를 통해 빠져나가려는 열유속이 증가하게 되기 때문에, 이 열유속을 감소시키기 위해서는 발열체로부터 유입되는 열을 감소시켜야 한다. 따라서 발열체의 온도를 낮출

수 있다. Fig. 6의 (c)는 Fig. 3 (c)의 Mo 봉을 사용하여 2160°C까지 발열체를 가열하고, 0.2°C/min의 발열체의 냉각속도로 성장시킨 결과로써 균열은 관찰되지 않았다. 그러나 씨앗 결정의 흔적은 항상 Mo 봉의 선단의 지름과 같은 크기로 남아 있었다. 씨앗 결정의 흔적이 크면 클수록 씨앗 결정이 미용융될 확률도 높아지게 될 것이다. 씨앗 결정의 흔적을 줄이기 위해서는 Mo 봉의 선단 부분의 단면적을 줄임으로서 가능하기 때문에 Fig. 3 (d)와 같이 Mo 봉의 선단의 단면적을 줄여 2120°C까지 발열체를 가열하고, 냉각속도를 0.2°C/min으로하여 결정을 성장시킨 결과가 Fig. 6의 (d)이다. 이 때 Mo 봉의 선단의 단면적이 줄어들어서 도가니 바닥을 통해 결정내로 들어오는 복사열의 양이 증가하게 된다. 따라서 열유출부의 역할을 충분히 할 수 있도록, 이 복사열이 씨앗 결정에 직접적으로 도달하는 양을 줄이기 위해, 도가니 바닥과 단열재의 간격을 줄임으로서 열유출부로서의 역할을 충분히 할 수 있도록 하였다. 발열체의 온도가 2120°C로서 다른 형상의 열유출부를 사용하였을 때의 온도보다 약 40~50°C 낮아졌지만, 씨앗 결정의 표면이 균일하게 용융되었으며 씨앗 결정의 흔적은 Mo 봉 선단의 지름과 비슷하게 남아있었다. 이와 같이 열유출부의 형태는 sapphire 용액내의 온도 구배에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

#### 3.4. 발열체의 냉각속도가 결정의 품질에 미치는 영향

Fig. 7은 2150°C까지 발열체를 가열한 후 30분간 유지하고 발열체의 냉각속도를 0.4°C/min~0.05°C/min로 변화시켜 제조한 sapphire 결정들이다. 발열체가 냉각되기 시작하

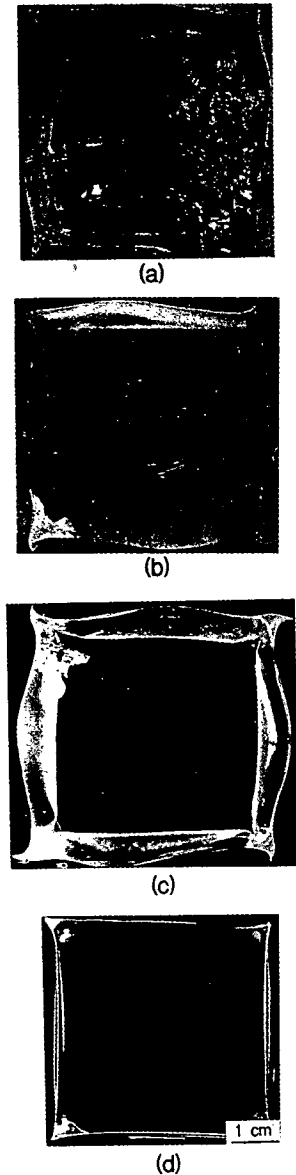


Fig. 6. Effects of the heat exchanger shape on the sapphire crystal quality. (a) case of Fig. 3(a) (maximum temperature : 2170°C), (b) case of Fig. 3(b)(maximum temperature : 2170°C), (c) case of Fig. 3(c) (maximum temperature : 2160°C), and (d) case of Fig. 3(d) (maximum temperature : 2120°C).

면 결정은 열유출부 역할을 하는 Mo 봉이 위치해 있는 도가니 바닥의 중앙부터 응고가 시작되어 용액 표면과 도가니 내벽을 향하여 응고 계면이 이동하게 되며, 응고시 방출된 응고 잠열은 Mo 봉을 통하여 빠져나가게 된다. 응고 계면의 이동 속도는 발열체의 냉각 속도에 따라 변하게 된다. (a)는 발열체의 냉각속도를  $0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로하여 결정을 성장시킨 결과로서, 결정 주위에 백색의 띠 모양이 형성되었다. 이 띠는 결정 내부에 포획되어 남아있는 기공들이 모여 이루어졌다. 결정 성장시 발열체의 냉각속도가 빠르기 때문에 응고 계면의 이동 속도로 빨라지게 되고, 용액 내의 온도 구배가 커지게 된다. 이 응고 잠열이 Mo 봉을 통해 효과적으로 빠져나가지 못하고 용액 내부에 유동하고 있던 가스 등이 포획되어 이와 같은 기공 띠를 형성하였다. (b)와 같이 발열체의 냉각속도가  $0.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 일 경우에도 기공 띠가 형성되었으나 (a)의 경우에 비교하여 기공 띠의 폭이 감소하였음을 관찰할 수 있다. 이러한 기공 띠는 발열체의 냉각속도를 감소시킴으로써 효과적으로 제거할 수 있다. (c)는 발열체의 냉각속도가  $1.0^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 로하여 결정을 설정시킨 경우로서, 응고 잠열이 Mo 봉을 통하여 효과적으로 제거되고 따라서 용액 내의 온도 구배가 줄어들어 응고 계면이 이동할 때 결정 내의 기공 등을 표면으로 밀어내었기 때문에 모서리를 제외하고는 거의 기공 띠를 관찰할 수 없었으며, 발열체의 냉각속도가  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 인 (d)의 경우에는 결정 전체에 걸쳐 기공이 존재하지 않았다. 이와 같은 기공의 존재는 결정성장시 원자가 재배열할 때 격자 결함을 유발시킬 수 있기 때문에, 발열체의 냉각속도를 느리게하여 응고 계면의 이동 속도를 느리게 하므로써, 즉 응고 잠열이 열유출부를 통하여 효과적으로 제거되도록 하여

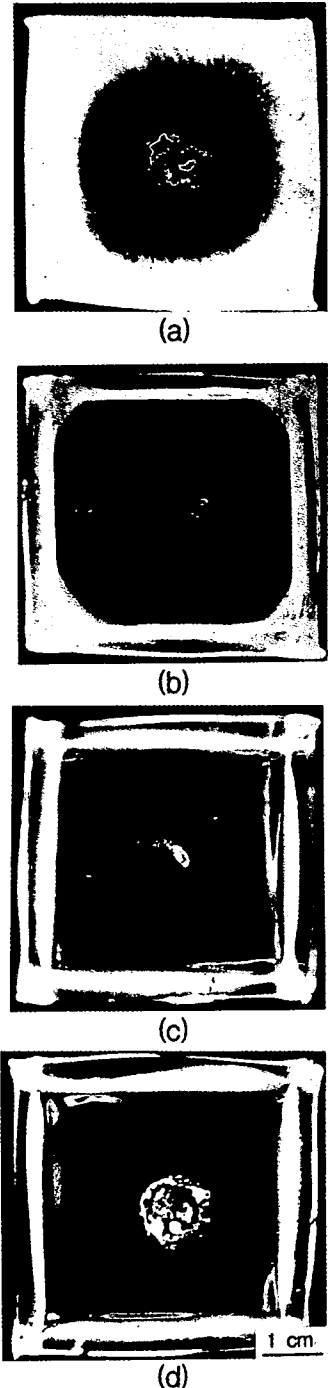


Fig. 7. Grown Sapphire crystals with the cooling rates of (a)  $0.4^{\circ}\text{C}$  (b)  $0.2^{\circ}\text{C}$  (c)  $0.1^{\circ}\text{C}$  (d)  $0.05^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .



야 함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

수정된 열교환법을 사용하여  $45 \times 45 \times 20$  (mm) 크기의 사각단면을 가진 sapphire 단결정을 제조할 수 있는 조건을 확립하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 냉각 매체로써 물을 이용하는 수정된 열교환법에 의해 사각단면 형태를 갖는 sapphire 단결정을 제조할 수 있었다.

2) 온도에 따른 성장로 내의 압력 변화로부터 sapphire의 용융 및 응고 과정을 추적할 수 있었으며, 이로부터 sapphire 단결정은  $1970 \sim 1960^\circ\text{C}$ 에서 응고가 완료됨을 알 수 있었다.

3) 도가니 성형시 이루어지는 '귀'의 형태는 도가니 벽면과 접촉되지 않는 '나선형태' 이어야 하였다.

4) 용액내의 열유속과 씨앗 결정의 흔적은 Mo 봉의 체적 변화로서 조절할 수 있었다.

5) 결정내의 기공 형성을 억제하기 위해서는  $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$  이하의 발열체의 냉각속도가 요구되었다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] F. Schmid, C.P. Khattak and D.M. Felt, Am. Ceram. Soc. Bull. 73(2) (1994) 39.
- [ 2 ] E. Ryskewitch and D.W. Richerson, Oxide Ceramics, Physical Chemistry and Technology, 2nd Edition, (General Ceramics, Inc., Haskell, New Jersey, 1985) p. 487.
- [ 3 ] J.W. Cook jr and J.F Schetzina, Laser Focus World, March (1995) 101.
- [ 4 ] B.G. Levi, Physics Today 20 (1996) 18.
- [ 5 ] F. Schmid and C.P. Khattak, Laser Focus 19 (1983) 147.
- [ 6 ] I. Akasaki, H. Amano and H. Murakami, J. Crystal Growth 128 (1993) 379.
- [ 7 ] T. Detchprohm, H. Amano, K. Hiramatsu and I. Akaasaki, J. Crystal Growth 128 (1993) 384.
- [ 8 ] 최회진, 김성균, 김동익, 나형용, 대한 금속학회지 33 (1995) 578.
- [ 9 ] 최회진, 김성균, 김동익, 나형용, 대한 금속학회지 33 (1995) 1483.
- [ 10 ] E. Ryskewitch and D.W. Richerson, Oxide Ceramics, Physical Chemistry and Technology, 2nd Edition, (General Ceramics, Inc., Haskell, New Jersey 1985) p. 490.