이 논문은 한국결정성장학회 연구윤리위원회 심의(2017.6.2.) 결과, 연구부정행위(부당한 저자표시)가 확인되어 게재가 철회된 논문임

Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 23, No. 2 (2013) 59-66
http://dx.doi.org/10.6111/JKCGCT.2013.23.2.59

Numerical analysis of sapphire crystal growth process using Ky and CZ method

Ho-Yong Shin, Ji-Hyun Im and Jong-In Im†

Simulation Center, Business Support Div., KICET, Seoul 153-801, Korea

(Received January 7, 2013)
(Revised January 21, 2013)
(Accepted February 1, 2013)

Abstract Sapphire crystals are used in a substrate of the LED devices. Both Kyropoulos (Ky) and Czochralski (CZ) growth process are widely applied techniques for growing high quality sapphire single crystal. A successful growth of the sapphire crystals requires the control of heat and mass transport phenomena. In this study, the growth processes of the sapphire crystal using the resistivity-heated Ky method and the inductively-heated CZ method have been analyzed numerically using finite element method. Based on the simulation results, the melt-crystal interface of the crystal changed from the concave to the flat shape as the Ky process progressed. In case of the CZ method, the high temperature positions moved from the crucible surface to inside the melt and the interface changed to the flat shape when the RPM was increased. Also the interface shape of the grown crystal has been influenced by the formed shoulder shape at the initial stage.

Key words Sapphire, Kyropoulos, Czochralski, Numerical analysis, Crystal shape

Ky 및 CZ 방법을 사용한 사파이어 단결정 성장공정의 수치해석

신호용, 임지현, 임종인†

한국세라믹기술원 기업지원본부 시뮬레이션센터, 서울, 153-801

(2013년 1월 7일 접수)
(2013년 1월 21일 심사완료)
(2013년 2월 1일 게재확정)

요 약 LED용 기판용 고품질의 사파이어 단결정을 성장시키기 위하여 Kyropoulos(Ky) 및 Czochralski(CZ) 성장공정이 많이 적용되고 있고, 성장공정 중 열 및 물질 전달현상의 제어가 필수적으로 요구된다. 본 연구에서는 저항 가열방식의 Ky 방법 및 유도 가열방식의 CZ 방법을 사용한 사파이어 단결정 성장방법을 FEM을 사용하여 수치적으로 분석하였다. Ky법의 수치분석의 결과, 결정성장이 진행됨에 따라 결정의 고-액 계면은 오목한 형상에서 편평한 형상으로 변화됨을 확인하였다. CZ 방법의 경우, RPM이 증가함에 따라 최 고온부의 위치가 도가니의 표면에서 융액의 내부로 이동하고, 고-액 계면도 보다 편평한 형태로 변화된다. 그리고 성장된 결정의 고액-계면은성장 초기에 형성된 shoulder의 모양에 영향을 받는 것으로 분석되었다.

RETRACTED

1. 서 론

최근 LED 기판용 주목을 받고 있는 사파이어 단결정(Al_2O_3)은 hexagonal 결정구조를 가지고 있고, 결정면 방위에 따라 다양한 용도로 사용되고 있다. 사파이어의 c 결정면은 LED기판용으로, a 결정면 등은 LCD 및 광학용, 내화학용 등으로 사용되고 있다. 이러한 사파이어 단결정의 성장기술로는 Bridgman, Kyropoulos(Ky), Czochralski(CZ), Edge-defined Film-fed Growth(EFG), Heat Exchange Method(HEM) 등 다양한 기술이 적용되고 있다[1, 2].

모노크리스탈사에서 개발된 Ky 성장법은 a축으로 배향된 사파이어 단결정을 성장하는 방법으로 직경 300 mm 및 65 kg의 단결정을 성장시킨 것으로 보고되고 있고[3, 4], 현재 국내에서도 100 kg 정도의 단결정을 성장하기 위하여 다양한 연구가 진행되고 있다. 반면 CZ 성장법은

†Corresponding author
Tel: +82-2-3282-2491
Fax: +82-2-3282-7801
E-mail: jongin@kicet.re.kr

www.kci.go.kr

융액에서 단결정을 성장시켜 수직으로 인상하므로 c축으로 배향된 실린더형 사파이어 단결정을 대량 성장시킬 수 있는 기술이다. Ky법과 CZ법의 차이는 저항 발열 혹은 RF 유도가열의 차이이고, 단결정을 융액의 내부에서 혹은 융액의 외부로 성장시키는 방식의 차이에 있다.

사파이어 성장로 내부의 열의 대류 및 전도, 복사현상은 결정성장 공정의 열이력 특성에 직접적인 영향을 미친다. 또한 열이력 특성은 성장로의 형상 및 열원 위치, 도가니 및 단열제의 배치 등 많은 요인에 의하여 많은 영향을 받는다[3-6]. 단결정의 품질은 성장로 내부의 열이력 및 물질 전달 현상과 아주 밀접한 관계가 있고, 고품질의 단결정을 제조하기 위해서는 이들 현상에 대한 제어가 아주 중요하다.

지금까지 실리콘 등 단결정에 대한 CZ 성장공정에 대한 수치 해석은 많이 보고 되었지만, 사파이어 결정 성장공정에 대한 시뮬레이션은 거의 이루어 지지 않았다. 최근에 소수의 연구자들이 사파이어 결정 성장공정 중 열 전달 및 유체 유동에 대한 2차원 수치해석으로 성공적으로 분석하였다고 보고 하였다[3-7]. 이들 연구는 Ky법 및 CZ법의 결정 성장공정을 해석한 것으로는 큰 의미가 있지만, 실제적인 사파이어 결정 성장공정에 적용하기에는 다소 부족하다고 판단된다.

본 연구에서는 실질적인 사파이어 성장에 적용하기 위하여 Ky법 및 CZ법을 사용한 전체 성장공정을 FEM을 사용하여 수치적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 사파이어 성장로 전체를 모델링하고, 단결정의 성장 초기부터 말기까지 열 유동특성 및, 단결정의 형상 등을 분석하고자 하였다.

2. 결정 성장로의 구조 및 수치해석 모델

2.1. 결정 성장로의 구조

사파이어 결정을 성장시키는 Ky 및 CZ 시스템에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다[4, 6].

Ky 성장 시스템은 Fig. 1(a)와 같이 텅스텐(W) 도가니 내부에 융액, 결정 및 seed 등으로 구성되는 결정화 영역 및 하부의 지지부로 구성된다. 또한 W 저항 발열체는 도가니의 측면 및 하부에 위치되고, 발열체 외부로 열 방출을 차단할 목적으로 판상형 Mo의 여러 층으로 구성된 열 반사판이 배치 된다. Ky 성장로 경우, W 히터에 공급되는 전력에 의해 저항 발열하여 융액을 형성하고, 결정성장의 초기에만 상부의 종자 결정의 회전 및 인상에 의해 결정화가 진행된다. 그 이후에는 결정의 회전은 하지 않고, 공급 전력의 제어에 의해만 도가니 내부에서 사파이어 결정을 성장시키는 특징이 있다.

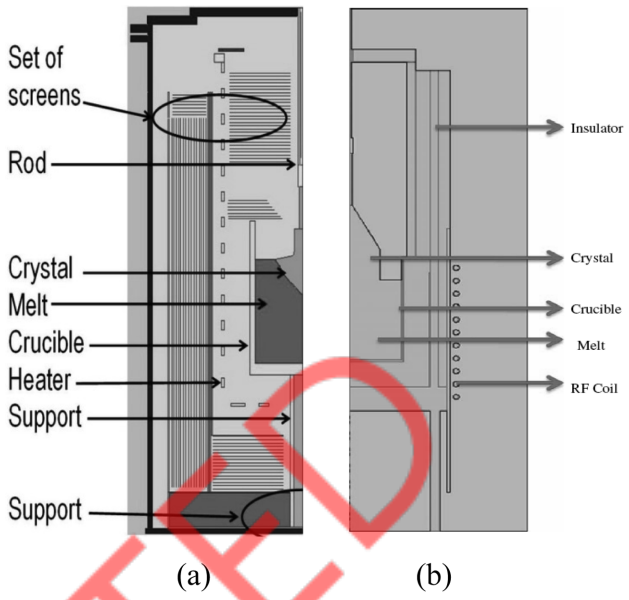


Fig. 1. Schematic diagram of the sapphire crystal growth system: (a) Ky and (b) CZ mothod [4, 6].

Fig. 1(b)에 나타낸 바와 같이, CZ 성장 시스템은 융액 및 결정, 종자 결정 등을 포함하는 결정화 영역, Ir 도가니, 단열재, RF 코일, 시스템 지지부 등으로 구성된다. CZ 성장로의 경우, 원형으로 배치된 RF 코일에 공급되는 AC 전류에 의해 도가니가 발열하여 융액을 형성하고, 상부의 종자 결정 및 성장된 결정을 회전 및 인상시키면서 결정을 성장 시킨다. 또한 도가니에서 발열된 열량의 외부 유출을 막기 위하여 도가니의 주위에 고온에서 안정한 지르코니아 및 알루미나 등의 단열재가 설치된 구조로 이루어 진다.

일반적으로 사파이어는 진공 혹은 불활성 분위기에서 성장되므로 모든 성장 시스템에 가스의 유입 혹은 배출구가 설치되어 있다. 이들을 고려할 경우, 성장로는 엄밀하게 축 대칭이 아니지만 본 연구에서는 해석의 단순화 및 시간 단축을 위하여 축대칭으로 가정하고, 성장로의 유체 유동 및 열 전달을 분석하였다.

2.2. 수치해석 모델

사파이어 성장 시스템을 수치해석 하기 위해서는 열원, 융액, 결정, 고액 계면, 주위 구조물 등의 sub system에 대한 고려가 필요하다. 열원으로는 저항가열 및 RF 유도가열을 고려하여야 하고, 사파이어 결정에 대하여서는 복사 및 전도 등에 대한 열 전달을 고려하여야 한다. 융액 및 고액 계면에서는 전도 및 대류, 유동 등의 물리적 현상을, 내화재 등 주위 구조물에서는 전도, 대류, 복사 등 물리적 현상을 고려하여 분석하여야 한다.

RF 유도 가열의 경우, 모든 구성 재료는 등방성 비자

RETRACTED
www.kci.go.kr

성체이고, RF 코일의 전류 및 전압 분포는 균일하며 전자기장은 도가니 및 히터의 온도와는 무관하다고 가정하였다. RF 유도가열에 대한 전자기장 지배방정식은

$$j\omega\sigma_c(T)\vec{A} + \nabla\times\left(\frac{1}{\mu_0}\nabla\times\vec{A}\right) = 0 \quad (1)$$

이고[5, 6], j는 conjugate, $\vec{A}$는 자기폰텐셜 벡터, ω는 각 주파수, μ_0는 진공 투자율, σ_c는 전기전도도를 의미한다. 그리고 이리듐(Ir) 도가니의 전기전도도는

$$\sigma_c(T) = \frac{1}{\rho_0(1+\alpha_r(T-T_0))} \quad (2)$$

와 같이 나타내어 진다. 여기서 ρ_0 및 α_r은 각각 실온에서의 전기저항 및 전기저항의 온도계수를 의미하고, T 및 T_0는 각각 실제 온도 및 실온을 의미한다. 또한 AC 전류에 의한 Ir 도가니의 유도가열 열량은(Q_{ind})은

$$Q_{ind} = \frac{1}{2}\sigma_c|\vec{E}|^2 \quad (3)$$

과 같이 표현되고, $\vec{E}$는 RF 코일의 자기장에 의해 유도된 전기장 포텐셜을 의미한다.

사파이어 성장로 전체 시스템의 열 전달은 전도 및 복사에 의한 고체간의 열 교환등 에 의해 이루어 지고, 이에 대한 지배방정식[4]은

$$\nabla\cdot(k\nabla T) - Q = 0 \quad (4)$$

와 같다. 여기서 Q는 열원의 발생 총 열량, k는 온도에 의존하는 열전도도를 의미한다. 그리고 고체 표면간의 복사 열 교환에 대한 지배방정식은 Stephan-Boltzman 법칙에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q^{out} = \varepsilon C_{SB}T^4 + (1-\varepsilon)Q^{in} \quad (5)$$

여기서 Q^{out} 및 Q^{in}은 각각 표면에서 방출 및 유입되는 복사열이고, ε은 방사도, $C_{SB}(=5.67\times10^{-8}(W/m^2C^4))$는 Stephan-Boltzman 상수를 의미한다. 그리고 특정 표면에 유입되는 전체 복사열은 성장로의 디자인 및 모델에 따른 영향을 받는 분포인자를 곱하여 계산할 수 있다.

결정 및 융액을 포함하는 결정화 영역에서의 준안정 상태이고, 융액은 비압축성 Newtonian 유체로 가정하였으며, 융액의 내부 복사는 무시하였고, 융액의 표면은 편평하다고 가정하였다. 결정화 영역의 열 전달 및 물질 이동에 대한 지배방정식은 다음과 같다[4-6].

$$\nabla\cdot\vec{u} = 0 \quad (6)$$

$$\rho_l\frac{d\vec{u}}{dt} = -\nabla p + \nabla\cdot(2\nu_{eff}\dot{S} + \rho\beta(T_m - T))\vec{g} \quad (7)$$

$$\rho_l C_p\frac{dT}{dt} = \nabla\cdot(k_{eff}\nabla T) - \nabla\cdot\vec{Q_r} \quad (8)$$

여기서 ρ_l는 융액의 밀도, $\vec{u}$는 속도, $\vec{g}$는 중력, p는 압력, $\vec{Q_r}$은 복사열 벡터, β는 열팽창계수, $\dot{S}$는 변위 속도 텐서, ν_{eff}는 유효 동적 점도, C_p는 비열, T는 온도, T_m은 사파이어의 용융 온도, $k_{eff} = k + \nu/P_r$은 유효 열전도도, $P_r = 0.9$는 터블런스 Prandtl 상수를 의미한다. 그리고 유도 가열된 도가니 및 결정, 나머지 고체 부분에 대한 지배방정식은 각각 다음과 같이 나타내어 진다.

$$-\nabla\cdot(-k_{cru}\nabla T) - Q_{ind} = 0 \quad (9)$$

$$\rho_{crystal}C_{crystal}\vec{u}_p\cdot(\nabla T) - \nabla\cdot(k_{crystal}\nabla T) = 0 \quad (10)$$

$$-\nabla\cdot(-k_{solid}\nabla T) = 0 \quad (11)$$

여기서 $\rho_{crystal}$ 및 $C_{crystal}$는 각각 사파이어의 밀도 및 비열이고, $\vec{u}_p$는 결정의 성장 속도를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

사파이어 성장 시스템의 특성을 분석하기 위해서는 저항발열 및 RF 유도발열에 의한 내부 온도분포 및 융액 유동특성, 성장된 결정 형상 등에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서 사용한 사파이어 성장 시스템의 구성 부품에 대한 열 물성을 각각 Table 1에 나타내었다. 사파이어 Ky 방법으로 결정 성장 전의 원료 투입량 및 성장 결정의 직경, 높이는 각각 50 kg, 약 250 mm, 약 350 mm 이었고, CZ 방법의 경우, 결정 성장 전 융액 높이는 285 mm이고, 성장된 결정의 직경은 100 mm이었다. 그리고 결정성장로에 흐르는 가스 양에 따라 내부 온도분포가 달라지고, 결정성장 과정도 영향을 받으므로 본 연구에서는 가스 유속이 2 *l*/min인 경우로 한정하고 분석을 수행하였다.

저항 발열 및 RF 유도가열 방식에 대한 온도분포를 해석하고, Ky 및 CZ법에 의한 사파이어 결정 성장 시스템에 대한 전체적인 온도분포를 분석한 결과를 각각 Fig. 2 및 3에 나타내었다. Fig. 2는 Ky 성장 시스템 내부를 Ar 가스로 충진된 상태에서 분석한 결과이다. 성장로 내부를 진공 상태로 해석한 결과, 발열체 및 외부 차폐 층에 의한 복사열로 도가니를 가열하기 때문에 국부적으로 도가니만 가열되는 온도분포를 갖는 것으로 분석되었다. 반면 CZ 성장 시스템의 경우, RF 코일에 의해 도가니가 가열되고, 발생한 열은 외부 단열재에 의해 외부 방출이 차단되기 때문에 상대적으로 고온부는 도가니 내부에 형성되는 것으로 분석되었다(Fig. 3 참조).

Ky 방법에 의한 성장 공정 중 내부 온도분포 및 결정

RETRACTED
www.kci.go.kr

Table 1
Thermo-physical properties of the constitutional material for Sapphire crystal growth system [4-6, 8]

Materials	Properties	Values
Sapphire	Melting temperature (K)	2323
	Density (kg/m^3)	Melt: 3,030/Crystal: 3,970
	Thermal conductivity (W/(m·K))	Melt: 3.5/Crystal: 17.5
	Heat capacity (J/(kg·K))	Melt: 1,430/Crystal: 1,260
	Latent heat (J/kg)	1,067,700
	Viscosity (Pa · s)	0.0475 / Dynamic: 0.057
	Thermal expansion coefficient (1/K)	5.0e-6
	Emissivity	Melt: 0.33 / Crystal: 0.869
Insulator	Density (kg/m^3)	3,500~6,000
	Thermal conductivity (W/(m·K))	0.048~1.8
	Heat capacity(J/(kg · K))	200~780
W crucible	Density (kg/m^3)	19,250
	Thermal conductivity (W/(m · K))	173
	Heat capacity (J/(mol·K))	24.27
	Electric Resistivity (nWm)	52.8
Ir crucible	Density (kg/m^3)	22,650
	Thermal conductivity (W/(m · K))	147
	Heat capacity (J/(mol · K))	25.10
	Electric Resistivity (nWm)	47.1
RF coil	Density (kg/m^3)	8,960
	Thermal conductivity (W/(m · K))	401
	Heat capacity (J/(mol·K))	24.44
	Electric resistivity (nWm)	16.78

Fig. 2. Simulated results of the global temperature distributions for the Ky growth system.

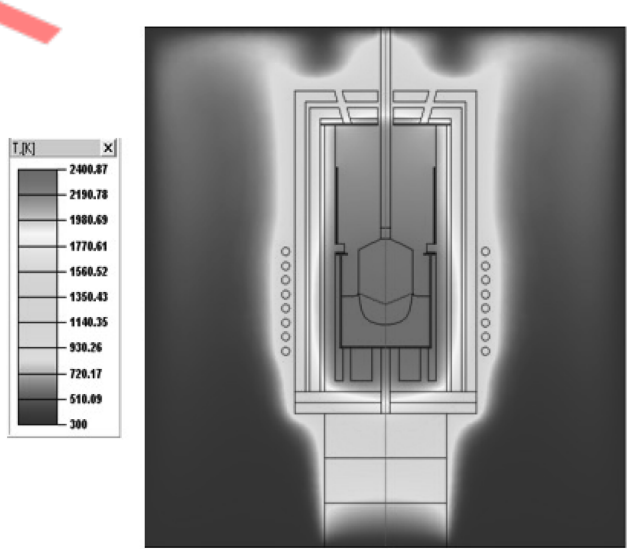


Fig. 3. Simulated results of the global temperature distributions for the CZ growth system.

의 성장 형태, 융액의 유동 형태를 분석하고, 그 결과를 각각 Fig. 4 및 5에 나타내었다.

Ky 방법의 성장 초기경우, 내부보다 외부가 먼저 결정화가 진행되기 때문에 고액 계면이 속이 빈 오목한 형상으로 형성되어 성장한다. 이러한 성장패턴은 중기까지 유지되다가 말기로 가면서 점차 편평한 형태로 결정이 성장하는 것으로 해석 되었다(Fig. 4 참조). 이러한 결정 성장 패턴은 융액의 유동 패턴을 분석한 Fig. 5의 결과에서도 확인할 수 있다. 즉 성장 초기, 융액은 내부 온도분포에 의해 상단부 및 하단부에 각각 시계 반대 방향 및 시계방향으로 큰 유동이 발생하고, 상단부 내부에 다시 조그마한 시계 방향의 열 유동이 존재한다. 이러한 결정 내부의 고온 열 유동에 의해 결정화가 지연되기 때

RETRACTED
www.kci.go.kr

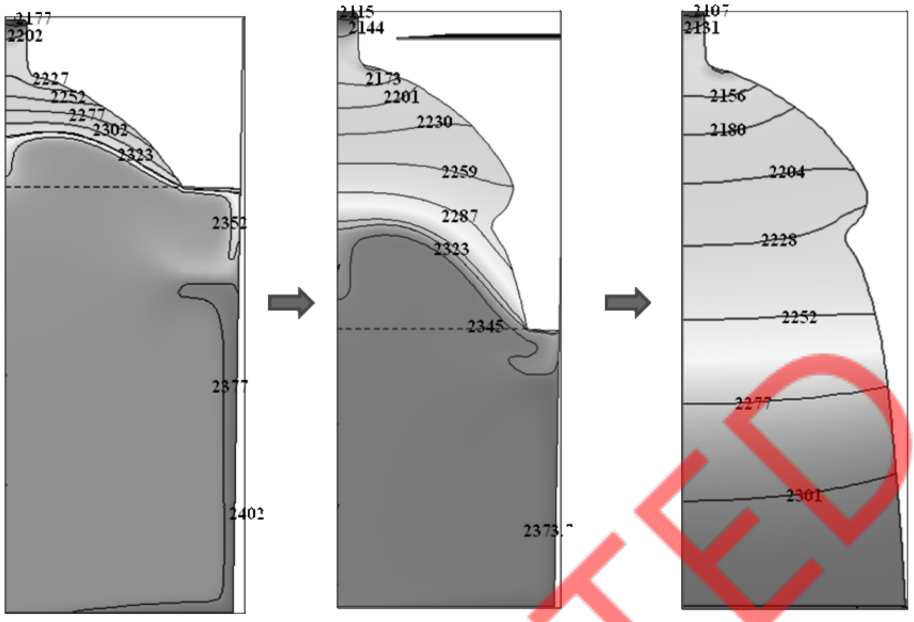


Fig. 4. Simulated crystal shape of the sapphire using the Ky method: (a) the initial stage, (b) the mid stage, and (c) the final stage.

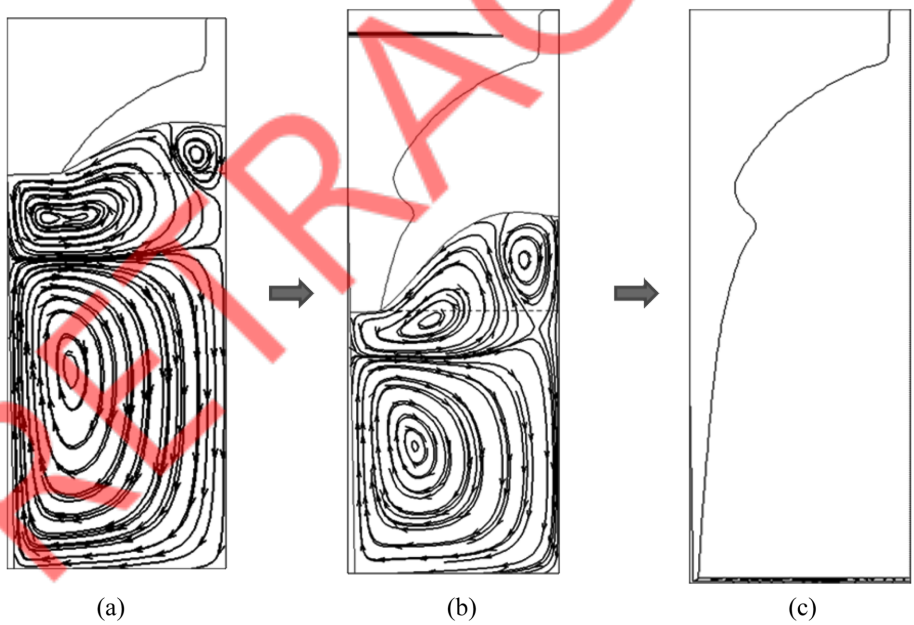


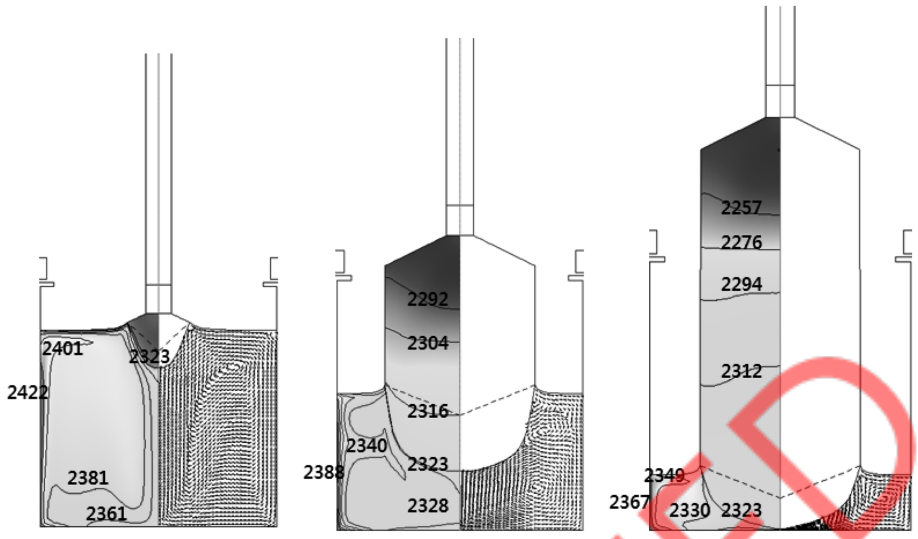
Fig. 5. Simulated flow patterns in the sapphire melt using the Ky method: (a) the initial stage, (b) the mid stage, and (c) the final stage.

문에 오목한 결정 계면이 형성된다고 추측할 수 있다. 이러한 현상은 성장 중기까지 유지되다가 계속 결정화가 진행되면 융액의 절대 양이 감소하게 되면서 편평한 고액 계면의 형성 및 결정화가 진행된다고 판단된다.

CZ 방법에 의한 사파이어 성장 공정 중 성장 단계별 결정의 형상을 분석하고, 결정의 회전속도 및 shoulder 형상 등이 성장된 결정의 형상에 미치는 영향을 주는지 분석하고, 그 결과를 각각 Fig. 6부터 8까지 나타내었다.

CZ 방법에 의한 결정 성장 단계별 온도분포 및 융액 유동특성, 결정의 형상 등에 대하여 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 결정 성장 초기 경우, 융액은 약 2361~2422 K 사이로 도가니 근처 측면의 온도가 가장 높고, 바닥부가 가장 낮은 온도 분포를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 온도분포 때문에 융액의 유동은 도가니 상부 측면에서 내부 방향으로 유동이 발생하는 것으로 나타났다. 성장 중기 경우, 융액 내부는 약 2328~

RETRACTED
www.kci.go.kr

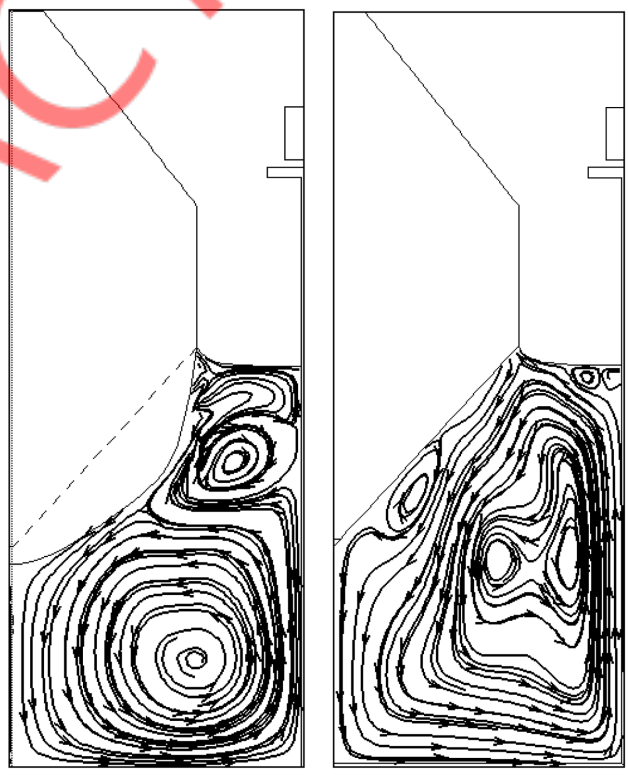


(a) (b) (c)

Fig. 6. Simulated crystal shape of the sapphire for the CZ system at the different growth stage: (a) the initial stage, (b) the mid stage, and (c) the final stage.

2388 K 정도로 온도분포를 갖는 것으로 해석되었고, 융액은 시계 반대방향으로 상부 및 하부에 두 개의 유동 패턴이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 성장된 결정은 약 2323~2292 K 정도의 온도 분포를 갖는 것으로 분석되었다. 결정 성장 말기 경우, 융액 및 성장 결정은 각각 약 2330~2367 K 정도 및 약 2323~2257 K 정도의 온도분포를 갖는 것으로 분석되었다. 즉 CZ 성장로 시스템을 이용하여 사파이어 단결정을 성장시킬 경우, 성장이 진행됨에 따라 융액 내부의 온도 차는 감소하고, 성장된 결정 내부의 온도차는 증가한다. 또한 성장 초기에는 시계 반대방향의 커다란 열유동 패턴을 보이다가 성장 중기에는 두 개의 열 유동 패턴으로 분리되는 현상이 나타난다. 이러한 유동 패턴은 RF heater의 가열조건 및 성장로의 구조 등을 조정함으로써 제어가 가능할 것으로 판단된다.

사파이어 CZ 성장공정 중 결정의 회전속도를 1 rpm부터 10 rpm까지 변화시키면서 융액 유동 및 결정의 고-액 계면 모양을 분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 결정의 회전속도가 1 rpm에서 10 rpm으로 증가함에 따라 용융 melt 온도의 분포는 전체적으로 올라가고, 고-액 계면 근처에서 온도도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 결정의 회전속도가 증가함에 따라 고-액 계면의 모양도 round형에서 sharp한 flat형으로 변화되는 것으로 분석되었다. 또한 낮은 rpm에서는 많은 와류형상의 유동 패턴이 보이지만 결정의 회전속도가 6 rpm 이상이 되면 단일 형상의 유동 패턴으로 변경되는 것을 확인하였다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때, 결정의 회전속도가 증가함에 따라 melt 및 결정 내부의 온도가 전체적으로 증가하게 된다. 또한 융액의 유동 속도 및 패턴이 변경되어



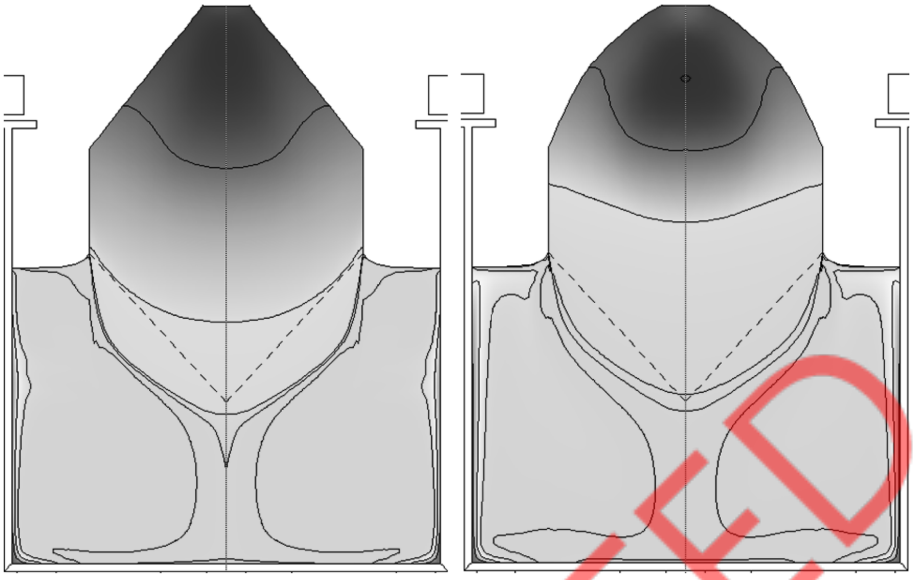
(a) (b)

Fig. 7. Influence of the RPM on the melt flow and the crystal shape for the CZ system at the mid stage: (a) 1 rpm and (b) 10 rpm.

상대적으로 결정화 영역이 감소하기 때문에 결정의 고-액 계면의 모양도 round형에서 sharp한 flat형으로 변화되는 것으로 판단된다.

사파이어 CZ 제조공정 중 초기에 형성된 Shoulder 모

RETRACTED
www.kci.go.kr

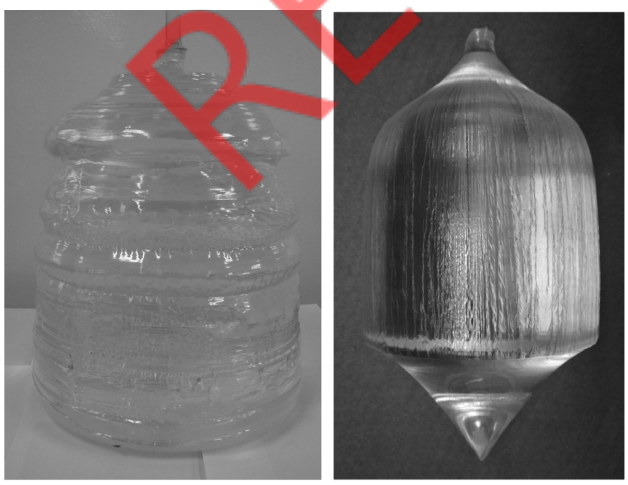


(a) (b)

Fig. 8. Influence of the shoulder type on the crystal shape for the CZ system at the mid stage: (a) the flat type and (b) the round type.

양이 성장된 결정의 형상에 미치는 영향을 분석하고, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 여기에서 알 수 있듯이, 성장 초기에 shouler 모양을 flat형에서 round한 형태로 변경함에 따라 melt 및 결정 내부의 온도가 약간 감소하는 것으로 분석되었고, 성장된 결정의 tail부도 좀 더 round한 형태로 변경되는 것으로 나타났다. 특히 flat한 shoulder에 의해 성장 결정의 중앙부의 sharp한 결정 tail이 round한 shoulder에 의해 제거될 수 있는 가능성이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 Ky 방법 및 CZ 방법을 사용하여 실험적으로 성장시킨 사파이어 단결정의 사진을 나타낸 것이다. 이 결과를 각각 Fig. 4(c) 및 Fig 8(a)의 시뮬레이션 결과와 비교하여 볼 때, 성장된 결정의 형상이 시뮬레이션 결과와 아주 유사한 것을 확인할 수 있고, 본 연구의 시뮬레이션 기법은 사파이어 성장공정 분석에 유용하게 적용할 수 있다고 사료된다.



(a) (b)

Fig. 9. Photographs of the grown sapphire crystal using (a) the Ky method and (b) the CZ method. (The photographs were obtained from the Iljin company and the KCC company in Korea).

4. 결 론

사파이어 결정의 Ky 및 CZ 성장공정은 고품질의 사파이어 단결정을 성장시키기 위한 중요한 기술중의 하나이고, 고 품질의 단결정을 성장하기 위해서는 성장로 시스템 내부의 온도분포 및 유동분포, 결정의 형상 등에 대한 제어가 필요하다. 본 연구에서 FEM 수치해석으로 저항발열 방식의 Ky 성장로 및 유도 가열방식의 CZ 성장로 시스템에 대한 사파이어 전체 성장공정을 성공적으로 분석하였다. 본 연구의 결과, Ky 성장공정이 진행됨에 따라 결정의 고액 계면은 오목한 형태에서 편평한 형태로 변해가면서 성장하는 것으로 분석되었다. 또한 CZ 성장 시스템의 경우, 결정의 성장이 진행됨에 따라 고온부가 도가니 표면에서 융액의 내부로 이동하고, 성장된 결정의 내부 온도 차이는 증가하는 것으로 분석되었다. 그리고 결정의 회전속도가 증가함에 따라 유동 패턴 및 유속이 변경되어 고-액 계면은 평편한 형태로 변화되는 것으로 분석되었다. 또한 결정의 고-액 계면은 초기에 형성된 결정의 shoulder 형상에 의해서도 영향을 받는 것으로 나타났다. 본 연구의 시뮬레이션 결과를 실험적

RETRACTED

www.kci.go.kr

으로 성장한 결정의 형상과 비교하여 그 타당성 및 유용성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] R. Feigelson, “50 years of progress in crystal growth”, J. Crystal Growth 264 (2004) xi.
[2] H. Scheel, “Historical aspects of crystal growth technology”, J. Crystal Growth 211 (2000) 1.
[3] S.E. Demina, E.N. Bystrova, M.A. Lukanina, V.M. Mamedov, V.S. Yuferev, E.V. Eskov, M.V. Nikolenko, V.S. Postolov and V.V. Kalaev, “Numerical analysis of sapphire crystal growth by the Kyropoulos technique”, Optical Materials 30 (2007) 62.
[4] S. Demina, E. Bystrova, V. Postolov, E. Eskov, M. Nikolenko, D. Mashanin, V. Yuferev and V. Kalaev, “Use of numerical simulation for growing high quality sapphire crystals by the Kyropoulos method”, J. Crystal Growth 310 (2008) 1443.
[5] M. Tavakoli, “Numerical study of heat transport and fluid flow during different stages of sapphire Czochralski crystal growth”, J. Crystal Growth 310 (2008) 3107.
[6] C. Lu, J. Chen, C. Chen, C. Chen, W. Hsu and C. Liu, “Effects of RF coil position on transport processes during the stages of sapphire Czochralski crystal growth”, J. Crystal Growth 312 (2010) 1074.
[7] J. Ryu, W. Lee, Y. Lee, H. Jo and Y. Park, “CFD analysis for effects of the crucible geometry on melt convection and growth behavior during sapphire single crystal growth by Kyropoulos process”, J. Korea Crystal Growth and Crystal Technology 22[3] (2012) 115.
[8] S. Lim, H. Shin, J. Kim and J. Im, “Finite element analysis for czochralski growth process of sapphire single crystal”, J. Korea Crystal Growth and Crystal Technology 21[5] (2011) 193.

RETRACTED

www.kci.go.kr