

자기장이 가하여진 초크랄스키 실리콘 단결정 성장에서 질량전달에 미치는 성장결정과 도가니의 회전효과

김창녕

경희대학교 기계공학과, 용인, 449-701

Effect of crystal and crucible rotations on the mass transfer in magnetohydrodynamic Czochralski crystal growth of silicon

Chang-Nyung Kim

Department of Mechanical Engineering, Kyung-Hee University, Yong-In 449-701, Korea

요 약 축방향으로 균일한 자장이 가하여진 Czochralski 도가니에서 도가니와 성장결정이 다양한 각속도로 회전하는 경우에 대하여 유동장, 온도장 및 산소의 농도장이 수치적으로 연구되었다. 도가니 벽의 가열에 의한 부력의 효과와 자유표면에서 온도차이에 의한 열모세관효과로 인한 용융물질의 유동은 도가니와 성장결정의 회전에 따른 원심력에 의하여 차등적으로 억제될 수 있다. 이 원심력에 가장 큰 영향을 주는 인자는 도가니의 회전속도이며 이것이 초크랄스키 결정성장과정에서 속도장, 온도장, 농도장에 큰 영향을 주고 있다. 도가니의 회전속도가 작을 때에는 성장결정의 회전이 원심력을 효과적으로 발생시킨다.

Abstract For various angular velocities of crucible and crystal, the characteristics of melt flows, temperatures and concentrations of oxygen are numerically studied in the Czochralski furnace with a uniform axial magnetic field. Buoyancy effect due to the heating of crucible wall and thermocapillary effect due to the temperature gradient at the free surface, can be differentially suppressed by the centrifugal forces due to the rotations of the crucible and crystal. The most important factor which yields the centrifugal forces is the rotation velocity of the crucible, that influences the fields of velocities, temperatures and concentrations. In the case that the crucible rotation velocity is not high, the rotations

of the crystal gives rise to the centrifugal forces effectively.

1. 서 론

원자구조가 균일한 단결정(single crystal)은 음파, 전자기파, 전하입자 등을 산란시키지 않고 그대로 통과시키므로 여러 가지 전자기와 전자광학부품에 많이 사용되고 있다. 최근의 전자, 기계공업분야의 첨단산업에서 단결정을 만들기 위한 기술들이 크게 발전하고 있으며 단결정의 필요성도 증대하고 있다. 실제로 산업계에서 사용되는 단결정의 80 % 이상이 실리콘 단결정이고 또한 실리콘 단결정을 성장시키는 방법 중 90 % 이상이 초크랄스키법을 이용하고 있다. 이 초크랄스키법은 용융물질과 불순물이 녹아 있는 도가니를 적절한 온도로 가열하며 seed crystal을 용융체 수면에 접촉시킨 후 서서히 위로 잡아 올리며 단결정을 성장시키는 방법이다.

단결정을 형성하게 되는 용융물질과 불순물이 녹아있는 도가니에 외부로부터 열이 가하여져 대류열전달이 강하게 나타난다. 이러한 대류는 열전달과 용융물질 및 불순물의 거동을 지배하게 되고 이 대류의 효과가 단결정의 질을 결정해주는 중요한 인자 중의 하나이다. 또한 회전방향으로 발생할 수 있는 열적인 비대칭 현상을 줄이기 위하여 일반적으로 결정과 도가니를 회전시킴으로서, 가열에 의한 자연대류효과 이외에 강제대류의 효과를 부과한다.

결정 성장에 중요한 또 다른 요인으로 용융물질의 자유표면에서의 반경방향의 온도구배를 고려할 수 있다. 굳어진 결정의 온도가 상대적으로 낮고 도가니의 벽온도는 상대적으로 높기 때문에 표면장력의 구배가 생기게

된다. 이러한 힘의 불균형 때문에 melt는 표면장력이 작은 곳에서 큰 곳으로 이동하게 되어 Marangoni convection (thermocapillary convection)을 야기한다.

성장결정이 silicon과 같은 반도체인 경우, 도가니 속의 용융물질이 수은과 같은 도체인 경우가 있다. 이러한 경우에 자장의 효과에 의해 발생하는 자성력(Electromotive force)을 이용하여 도가니 안에서의 유동을 제어할 수 있다[1-5].

Czochralski유동장에 걸린 자장은 대류작용을 억제하고 따라서 temperature fluctuation도 억제한다. 이러한 대류작용의 억제로 인하여 일정한 power로 가열되는 도가니에서 자장의 세기가 증가함에 따라 도가니 벽과 결정성장표면에서의 온도의 차이가 크게 되며 도가니의 벽의 온도는 상승하게 된다.

Czochralski방법으로 silicon을 성장시키는 경우 도가니는 silica로 만들어진다. 이 경우 도가니 벽에서 발생하는 용발(ablation)로 인하여 용융물질에 산소불순물이 생기게 된다. 그러나 30 ppm정도의 산소는 집적회로(integrated circuit)의 항복점을 높여주므로 산소를 제거하기보다는 산소를 용융물질 속에 일정하게 존재하게 하는 것이 필요하다. 이러한 산소 및 다른 불순물의 대류현상을 억제하기위하여 Czochralski 결정성장과정에서 자장을 걸어주면 고순도의 실리콘 결정을 얻을 수 있다.

성장결정의 회전방향으로의 균질성을 확보하기 위해서 도가니와 성장결정을 회전시키게 되는데 이때 이들의 회전으로 인하여 용융물질은 회전유체유동의 특성을 갖게 되어 산소의 거동에 큰 영향을 주게 되며 결정속

으로 흡수되는 산소의 양에 영향을 미치게 된다. 그러나 이와 같은 도가니와 성장결정의 회전에 따른 효과에 대한 연구는 미비한 상태이다. 본연구에서는 Magnetic Czochralski 결정성장 과정에서 성장결정과 도가니의 회전이 유동장에 미치는 영향을 이해한 후에 산소(oxygen)의 거동을 탐구하고자 한다.

2. 문제설정 및 수치해법

자기유체역학(Magnetohydrodynamics)의 이론을 Czochralski방법에 적용하여 도가니 안에 있는 용융물질의 거동을 해석하고자 한다[6]. 도가니 안에서의 유동에서 전류와 자장에 관한 time scale이 유체유동의 time scale에 비해 매우 작기 때문에 액체금속 유동의 경우와 마찬가지로 취급되어질 수 있다. 그리고 MHD유동에서의 quasistatic가정을 적용하여 displacement current와 charge density의 변화를 무시하였다.

축방향으로 균일한 자장을 걸어주게 되면 용융물질의 유동이 회전방향 대칭의 특성을 갖는다. 이 경우 도가니의 자오면(meridional plane)에서 미분방정식을 풀어 유동을 해석할 수 있다[7].

2.1. 산소의 전달현상의 특성

국소 농도분포가 부력에 큰 영향을 주지 않는다면 boron이나 산소와 같은 농도가 낮은 solute의 이동은 수동성(hydrodynamically passive)을 갖는다. 많은 불순물(impurity)들은 확산율(diffusivity)이 매우 낮기 때문에, 자장의 영향을 받는 Czochralski유동에서 속도장, 전기장, 온도분포가 정상상태로 유지되

는 반면 solute distribution은 계속 시간에 따라 변화하는 경우를 종종 관찰할 수 있다. 이러한 상태가 되면 속도, 전류, 온도를 다시 풀 필요가 없이 이들 값이 고정(freeze)되어 있다고 간주하고 시간에 따른 농도의 변화만을 계산하면 된다.

도가니의 벽은 silica로 만들어지는데 여기에서 발생하는 용발(ablation)로 부터 산소가 용융물질속으로 들어가며 산소의 sink는 결정에 들어가는 산소의 물질전달과 SiO₂의 형태로 자유표면에서 증발하는 물질전달로 이루어진다. 여기에서 증발은 빠른 속도로 이루어지는 반면, 자장의 영향으로 인하여 대류작용이 억제되고 산소의 확산계수도 매우 작으므로 대류와 확산을 통해 용융물질의 내부에서 자유표면으로 산소가 이동하는 과정은 매우 느리다. 산소농도에 관한 정상 및 준정상상태를 얻기 위한 시간을 줄이기 위하여 적절한 초기산소농도를 가정할 수 있다.

산소의 물질전달에 관하여 고려하여 볼 때 diffusion boundary layer 안에서의 산소농도의 변화를 제외하면 유동장에서의 농도의 변화는 상당히 작다. 즉 도가니 벽에 형성된 diffusion boundary layer안에 있는 유체입자는 벽으로부터 확산과정을 통하여 산소를 얻고 이 유체입자가 자유표면에 접한 boundary layer로 이동한 후 여기에서 역시 확산과정을 통하여 자유표면으로 산소를 잃는다. 산소의 segregation coefficient가 1보다 크므로(1.25) 결정성장표면 바로 아래의 용융물질에서는 다른 부분의 용융물질보다 산소의 농도가 낮게 된다.

2.2. 도가니와 성장결정의 회전

용융물질에서 성장중인 결정으로 산소가 전달되는 현상은 diffusion에 의하여 지배되

는 속도가 느린 과정이다. 그러므로 성장하는 결정 안에서의 산소의 농도는 성장결정에 인접해 있는 용융물질의 산소의 농도에 의존하게 된다. 성장결정에 인접한 용융물질의 산소의 농도를 제어하기 위하여 도가니와 성장결정의 회전수를 조절할 수 있다. 만약 도가니와 성장결정의 회전각속도가 서로 크게 다르다면 Taylor-Proudman column이 유동장에 형성될 수도 있으나 일반적으로 도가니와 성장결정의 회전수를 적절히 선택하므로서 성장결정 부근의 용융물질의 회전방향 속도와 반경방향 속도를 조절할 수 있다.

본 연구에서는 성장결정의 회전방식으로 1)도가니와 성장결정이 서로 같은 방향으로 같은 각속도로 회전하는 경우, 2)서로 같은 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우, 3)서로 다른 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우를 고려하였다.

2.3. 지배방정식과 경계조건

2.3.1. 지배방정식

용융물질의 운동이 액체금속과 마찬가지로 취급될 수 있다는 가정에 의하여, 유도된 자장을 무시할 수 있으므로 유동장 안의 자장은 걸어진 자장과 같게 되며 자장이 비회전이라면 전장은 비회전성이어서 전장의 세기를 어떤 scalar의 포텐셜(전위)의 구배로 나타낼 수 있다. 전류는 Ohm의 법칙에 의하여 나타낼 수 있고 전하(electric charge)의 보존법칙에 관한 식도 고려한다. 용융물질 내부의 유동은 자성력 $\vec{j} \times \vec{B}$ 를 포함하는 Navier-Stokes식에 의해 지배받게 되며 여기에서 열팽창은 부력항에서만 고려하기로 한다. 응고되는 결정이 왼쪽으로 끌어올려지는 속도는 매우 작아 이에 따른 유체유동은 무시할 만하다고 가정하면 대류현상과 확산현상

이 균형을 이루는 에너지방정식이 온도장을 지배한다. 또 같은 형태의 농도에 관한 비정상 상태의 방정식이 농도장을 지배한다. 비압축성 유동에 관한 질량보존의 법칙을 적용하고 전류의 흐름에 관하여 오옴의 법칙과 전하보존의 법칙을 사용한다.

2.3.2. 경계조건

Czochralski유동에서 경계조건을 살펴보면, 용융물질의 비중이 비교적 크고 용융물질이 회전유동을 한다고 하더라도 자장의 영향아래에서는 자유표면은 평평하다고 생각되어질 수 있다. 또 도가니와 성장표면에서는 점착조건을 적용한다. 또 자유표면에서는 수직방향의 속도성분은 없으며 thermocapillarity 때문에 수평속도 성분의 수직방향으로의 구배는 온도구배에 비례하게 된다. 이때 성립하는 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_r}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{dy}{dT} \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

(여기에서 $\frac{dy}{dT} = -1.04 \times 10^{-4} \text{ N/mk}$)

결정성장표면은 등온(isothermal)표면을 이루고 이때의 온도는 응고온도 T_s 를 나타내게 된다. 또한 도가니벽과 바닥에서 온도가 각각 아래식과 같이 경계조건으로 주어진다.

$$T = T_s + \Delta T \quad (2)$$

(도가니벽에서 : $\Delta T = 100 \text{ K}$)

$$T = T_s + \frac{\Delta T}{2} \left(1 + \frac{r}{R}\right) \quad (3)$$

(도가니바닥에서)

자유표면은 복사의 형태로 주위에 열을 빼앗기고 있으며 그 주위는 주어진 온도를 가진 black hemisphere로 간주될 수 있다. 자

유표면에서 온도에 관한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\epsilon \sigma_r}{k} (3T_s^4 + T_s^4) - \frac{4\epsilon_r T_s^4}{k} T \quad (4)$$

(여기에서 $T = T_s + T_{ex}$, T_s 는 결정물질의 용융온도이며 $T_s = T_m = 1685\text{k}$ 로 가정함)

도가니의 벽은 전기가 통하지 않는다고 간주할 수 있다. 성장중인 결정도 전기를 통하지 않는다고 가정한다. 그리하여 도가니의 벽과 바닥, 자유표면과 결정성장표면에서 각각의 면에 직각인 직류성분이 없다고 가정한다.

도가니 바닥과 벽에서 melt로 들어가는 oxygen flux는 도가니 바닥 및 벽의 면적, ablation rate 등에 비례하며, 자유표면에서 증발되는 oxygen flux는 자유표면 바로 아래의 산소의 농도와 실험적으로 얻어진 증발계수와의 곱에 비례한다. 도가니 면과 자유표면에서의 산소의 flux n_r 와 n_s 는 아래와 같이 각각 표현될 수 있다.

$$n_r = \left(\frac{32.00}{60.06}\right)A \quad (\text{도가니 면에서}) \quad (5)$$

$$n_s = c_r \cdot c_{ev} \quad (\text{자유표면에서}) \quad (6)$$

여기에서 c_r 는 자유표면에서의 산소농도를 의미한다.

산소가 결정속으로 흡수되는 flux n_s 는 결정성장표면 바로 아래의 산소농도 c_s 와 segregation coefficient k_s , 결정을 들어올리는 속도 P 들의 곱에 비례한다.

$$n_s = Pk_s c_s \quad (7)$$

여기에서 c_s 는 결정성장 표면에서의 산소

의 농도를 의미한다.

2.4. 수치계산

속도나 압력으로 표시되지 않는 큰 체적력 (body force)이 포함된 유동에서, 체적력이 유동장에서 어떤 물리법칙을 만족시키는 변수를 포함하는 경우에는 system에서의 지배방정식을 수치방법으로 연립으로 계산할 때 필요한 coupling에 이러한 힘의 효과가 고려되어야 한다.

자성력의 크기가 관성력이나 점성력의 크기와 같거나 큰 경우, 또는 자연대류에서 관성력이나 부력이 점성력에 비하여 훨씬 큰 경우에는 압력에 관한 Poisson 형태의 식을 얻어 MAC 또는 SMAC방법에서처럼 압력을 계산하면 수치계산에 있어서 안정적인 해를 얻을 수 있다.

또한 효과적인 수치계산을 수행하기 위해 계산영역에 있는 각각의 cell에 추가적인 질

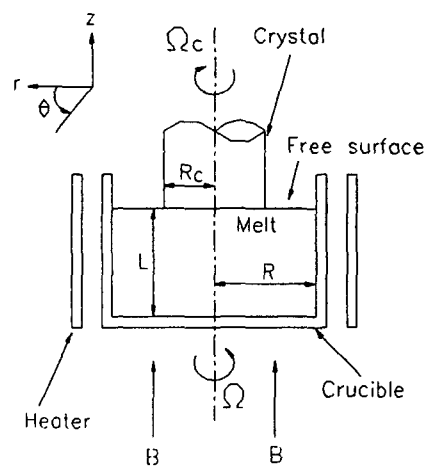


Fig. 1. Czochralski flow field with an axial magnetic field and cylindrical coordinate system (the origin is the center of the bottom).

Table 1
Numerical values in the formulation

Crucible radius	R	= 0.095 m
Crystal radius	Rc	= 0.038 m
Crucible depth	L	= 0.095 m
Magnetic permeability	μ_0	= $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
Electric conductivity	σ	= 1.0×10^6 S/m
Density	ρ	= 2330 kg/m ³
Volumetric expansion coefficient	α	= 1.41×10^{-5} /K
Characteristic temperature difference	ΔT	= 100 K
Kinematic viscosity	ν	= 3.0×10^{-7} m ² /s
Specific heat	cp	= 1.0×10^3 J/kgK
Thermal conductivity	k	= 67 W/mK
Melting point	Ts	= 1685 K
Melt emissivity	ϵ	= 0.318
Pull rate of growing crystal	P	= 2.117×10^{-5} m/s
Initial oxygen concentration	c	= 75.9 g/m ³
Oxygen diffusion coefficient	D	= 3.0×10^{-8} m ² /s
Oxygen segregation coefficient	ks	= 1.25
Oxygen evaporation coefficient	cev	= 3.36×10^{-6} m/s
Ablation rate	A	= 1.5×10^{-7} kg/m ² s

Table 2
Nondimensional parameters

	$\Omega=1.57$ (rad/s)	$\Omega=0.78$ (rad/s)
Reynolds number Re	4.72×10^4	2.35×10^4
Prandtl number Pr	1.04×10^{-2}	
Prandtl number(mass transfer)	3.0×10^1 for oxygen	
Prm		
Gr/(Re) ²	5.91×10^{-2}	2.39×10^{-1}
Interaction parameter N	2.73	5.50
Hartmann number M	3.59×10^2	
Buoyancy parameter β	2.16×10^{-2}	4.34×10^{-2}

량보존의 식과 전하보존의 식을 적용시킨다. Finite volume method를 이용하여 관성항과 점성항을 계산함에 있어 hybrid방식을 채택하고, 계산을 수행할 때에는 TDMA를 사용하였다.

3. 계산결과 및 고찰

자장의 영향아래에서 Czochralski 결정을 성장시키는 장치가 Fig. 1에 나타나 있는데 좌표계의 원점은 도가니(crucible) 바닥의 중앙에 위치하고 있다. Table 1에는 본 계산에서 사용된 silicon 용융물질 속의 산소의 거

동에 관한 여러 특성치가 제시되어 있으며 Table 2에는 도가니의 각속도가 1.57(rad/s)와 0.78(rad/s)인 경우에 대한 무차원 변수들의 값이 나타나 있다. 한편 Table 3에서는 본 계산에서 연구된 네가지의 서로 다른 도가니와 성장결정의 회전조건을 보이고 있다.

본 연구에서는 도가니와 결정성장이 같은 방향으로 같은 각속도로 회전하는 경우(Case 1: $\Omega = \Omega_c = 1.57$ rad/s), 도가니와 결정성장이 같은 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우(Case 2: $\Omega = 0.78$ rad/s, $\Omega_c = 1.57$ rad/s), 도가니와 결정성장이 다른 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우(Case 3: $\Omega = 1.57$ rad/s, $\Omega_c = -2.3$ rad/s), (Case

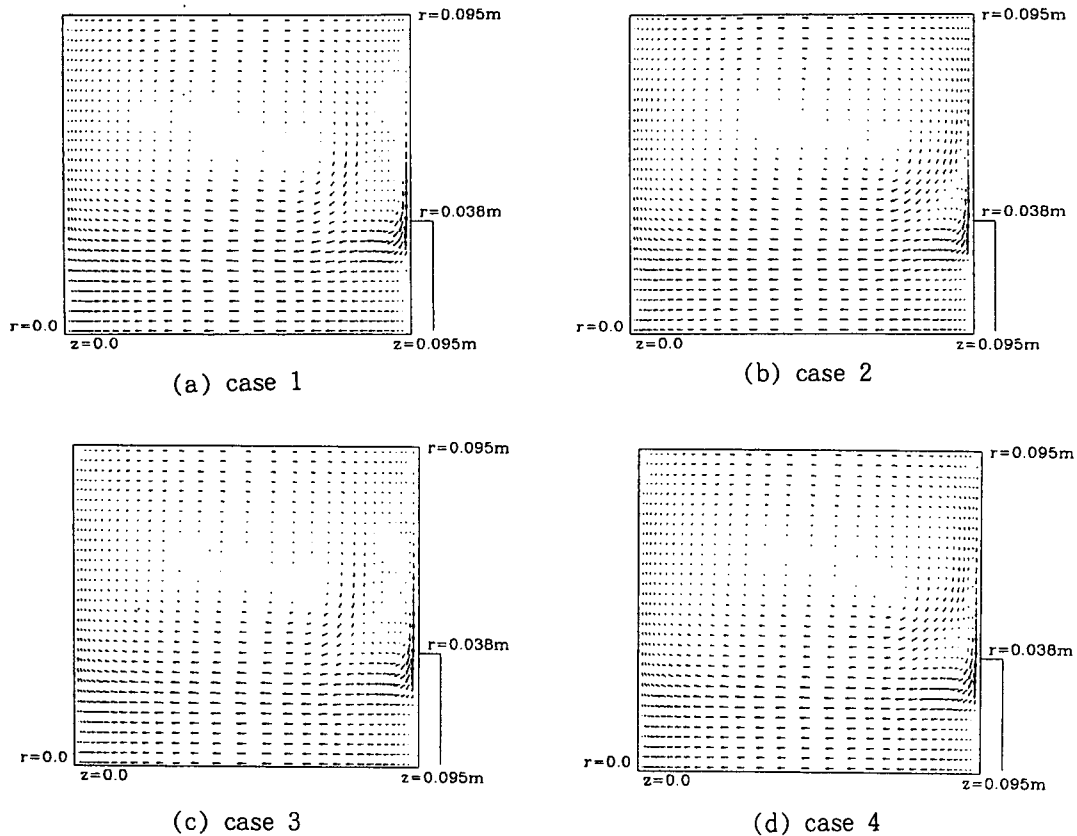


Fig. 2. Velocity vectors in a meridional plane with a uniform magnetic field[unit:meter/sec].

Table 3
Crystal and crucible rotation conditions

	Crucible angular velocity rad/s (rpm)	Crystal angular velocity rad/s (rpm)	Centrifugal pumping parameter λ
Case 1	1.57 (15)	1.57 (15)	1.46×10^{-1}
Case 2	0.78 (7.5)	1.57 (15)	2.94×10^{-1}
Case 3	1.57 (15)	-2.3 (22)	3.14×10^{-1}
Case 4	0.78 (7.5)	-2.3 (22)	6.32×10^{-1}

4: $\Omega = 0.78 \text{ rad/s}$, $\Omega_c = 1.57 \text{ rad/s}$ 에 대해서 해석하였다.

Fig. 2에는 각각의 경우에 대한 meridional plane에서의 속도가 나타나 있다. 여기에서 횡축은 회전축 방향을, 종축은 반경 방향을 각각 나타낸다. 이 그림에서 볼 때 결정의 가장자리 부근의 자유표면에서 회전축의 중심으로 향하는 thermocapillary flow가 나타난다. 이 유동은 자유표면에서의 반경방향에 따른 큰 온도구배 때문에 나타나는데 자유표면에서 z방향에 따른 속도 u,의 큰 구배를 만들어 준다. 이러한 thermocapillary 유동은 걸려진 자장의 세기를 조절함으로써 그 크기를 조절할 수 있다.

도가니의 회전 각속도가 15 rpm인 case 1과 case 3의 유동을 살펴볼 때 자유표면 아래에서 재순환 영역이 비교적 크게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 한편 case 2와 case 4에서는 이러한 재순환 영역은 성장결정의 가장자리 근처에서 작게 나타나고 있다. 각각의 경우에 대한 성장결정근처의 자유표면에서의 속도의 크기는 이 그림에서 비교하기 어려우나 앞으로 언급하게 될 온도분포에서 비교될 수 있다.

Fig. 3에는 meridional plane에서의 온도 분포가 나타나 있다. 이 온도분포는 대류작용에 크게 영향을 받고 있다. 도가니의 회전

속도가 작은 case 2와 case 4에서는 이 회전 속도가 큰 case 1과 case 3에 비하여 도가니의 회전으로 인한 원심력이 작게 되어 자유표면에서의 유동은 가열에 의한 대류와 marangoni convection의 영향을 더욱 크게 받는다. 그리하여 도가니의 회전속도가 작은 경우에는 성장결정의 가장자리에서 반경방향으로의 온도구배가 크게 발생하게 되는데, 이러한 반경방향으로의 국부 온도구배는 국부적인 marangoni convection 현상을 야기하여 국부 속도분포와 연관을 갖는다.

Fig. 4에는 초기 산소농도(75.9 g/m^3)가 주어진 상태에서 결정성장이 시작되어 3000 초 경과된 후의 산소 농도장이 나타나 있다. 시간이 경과함에 따라 도가니의 벽근처에서는 도가니 벽의 용탈로 인하여 산소의 농도가 증가하며 산소의 segregation coefficient가 1.25이므로 성장결정 부근에서는 크게 감소하고 있다. 한편 자유표면에서는 산소가 외부로 증발한다.

도가니의 회전속도가 큰 case 1과 case 3에서는 원심력의 효과로 인하여 대류작용에 의한 성장결정부근으로의 산소의 전달현상이 크게 억제되고 있다. 이러한 작용으로 인하여 case 1과 case 3에서는 다른 두 경우에 비하여 성장결정 표면에서 산소의 농도가 전체적으로 낮으며 균일해지려는 경향을 갖는

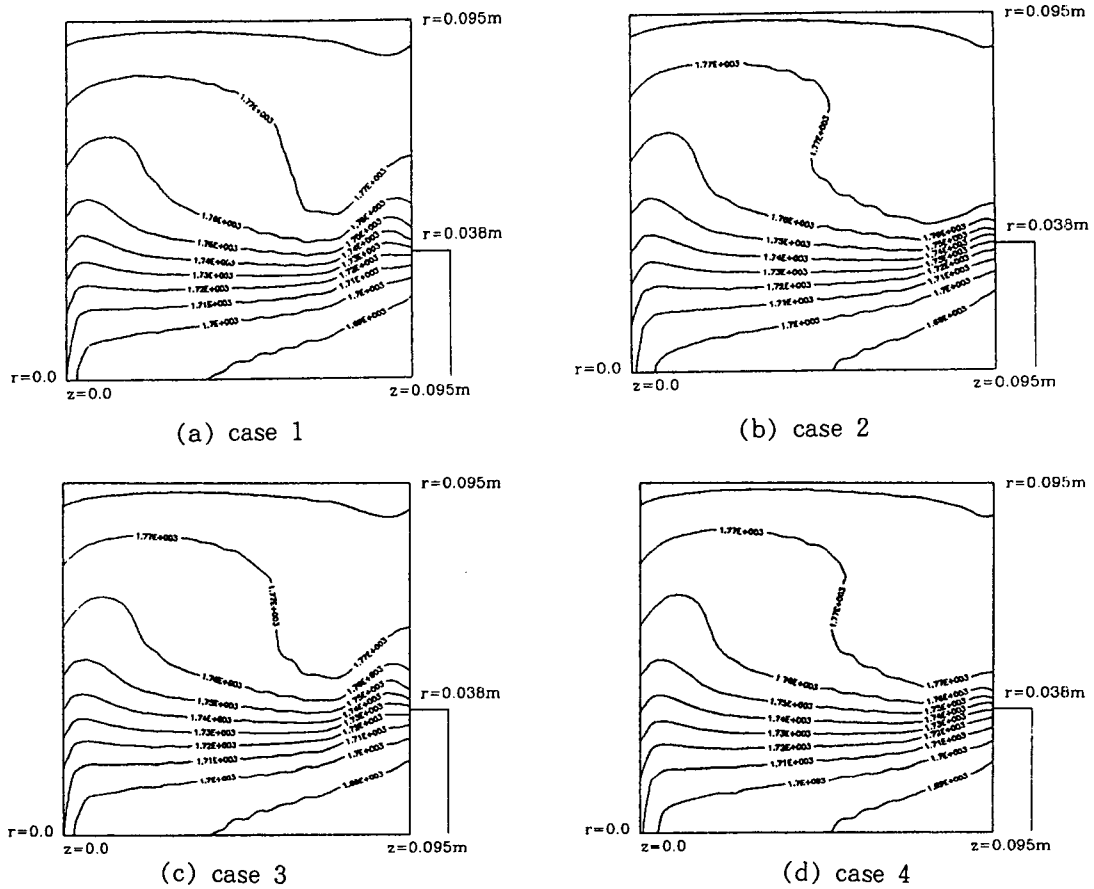


Fig. 3. Temperature distributions with a uniform magnetic field [unit:Kelvin].

다. 여기에서 도가니와 성장결정의 회전방향이 같은 case 1에서는 회전방향이 다른 case 3에 비하여 자유표면근처의 농도구배가 약간 더 크다. 이는 case 1에서 자유표면근처의 용융물질이 원심력을 더 크게 받기 때문이다. 한편 case 2와 case 4에서는 도가니의 회전효과가 다른 두 경우에 비하여 작으므로 상대적으로 가열에 의한 대류효과가 우세하여 자유표면부근에서 성장결정을 향한 안쪽의 흐름이 상대적으로 강하다.

그러나 case 2와 case 4를 비교하여 관찰하면, 도가니와 반대방향으로 성장결정을 22 rpm으로 회전시킨 case 4에서는, 도가니와 같은 방향으로 성장결정을 15 rpm으로

회전시킨 case 2에 비하여 자유표면 근처에서 성장결정을 향한 안쪽의 흐름이 덜 억제되고 있다. 이는 case 4에서 도가니와 성장결정의 회전방향이 다르므로 case 2에 비하여 성장결정부근의 자유표면 근처에 있는 용융물체에 원심력이 작게 작용하고 있기 때문이다. 여기에서 볼 때 도가니와 같은 방향으로 성장결정을 회전시키는 경우가 도가니와 반대방향으로 성장결정을 회전시키는 경우보다 원심력을 크게 작용하도록 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 시간의 경과에 따라 성장결정의 표면으로 흡수되는 산소의 양이 결정표면에서의 산소의 농도로 나타나 있다. 여기에

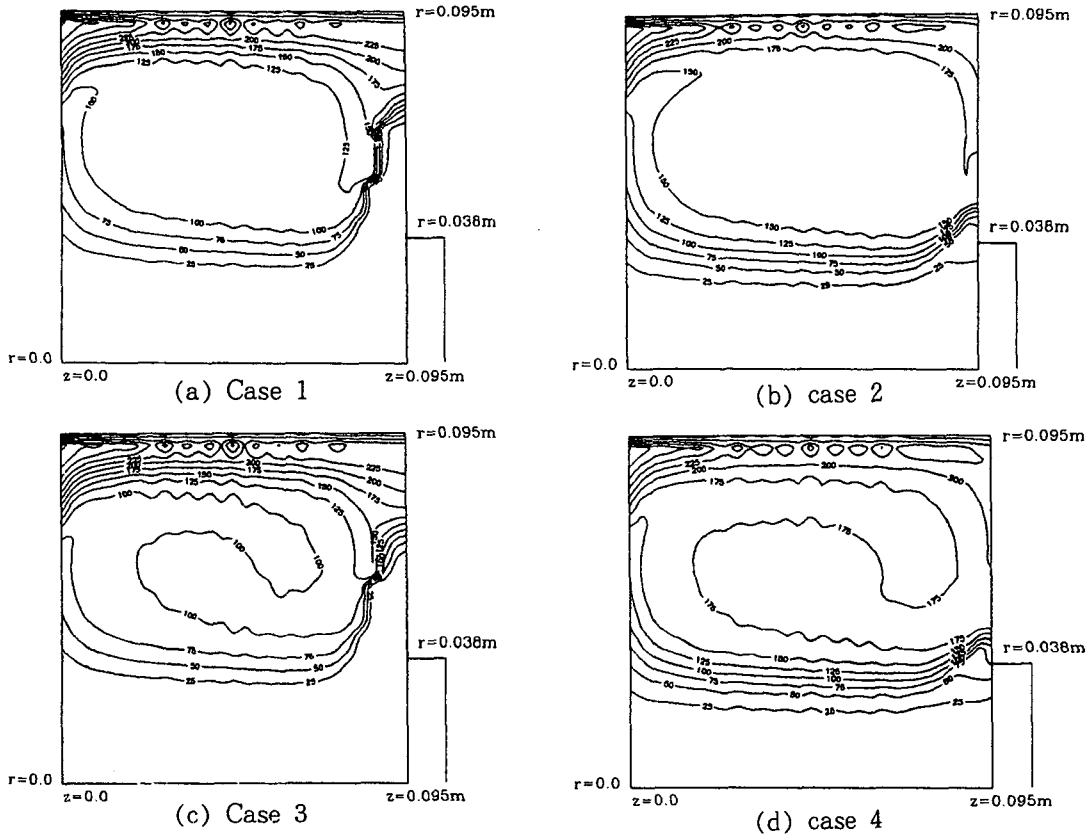


Fig. 4. Distributions of oxygen concentration at 3000 seconds after the starting of the growth [unit:g/m³].

서 산소의 농도는 결정표면의 중심축(회전축), 반경방향으로 반경의 50%만큼 떨어진 지점, 결정성장의 가장자리에서 고려되었으며 이들의 면적가중 평균치도 함께 나타나 있다. 위에서 언급된 바와 같이 각각의 경우에서 도가니와 성장결정의 회전효과로 인하여 유동장에 원심력이 차등적으로 가해지며 이 결과로 case 1과 case 3에서는 다른 두 경우에 비하여 흡수되는 산소의 농도가 전체적으로 균일성을 유지하며 감소하고 있다. 그러나 도가니와 성장결정의 회전방향이 다른 case 4에서는 회전방향이 같은 case 2에 비하여 원심력의 효과가 약하므로 성장결정

에서의 산소의 농도가 상대적으로 높다.

4. 결 론

균일한 자장이 도가니에 가하여졌을 때에 정상상태의 Czochralski 유동장과 비정상 상태에서의 산소의 농도장이 수치적으로 해석되었다. 여기에서는 도가니와 성장결정이 서로 같은 방향으로 같은 각속도로 회전하는 경우, 서로 같은 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우, 서로 다른 방향으로 다른 각속도로 회전하는 경우에 대한 연구가 수행되었다.

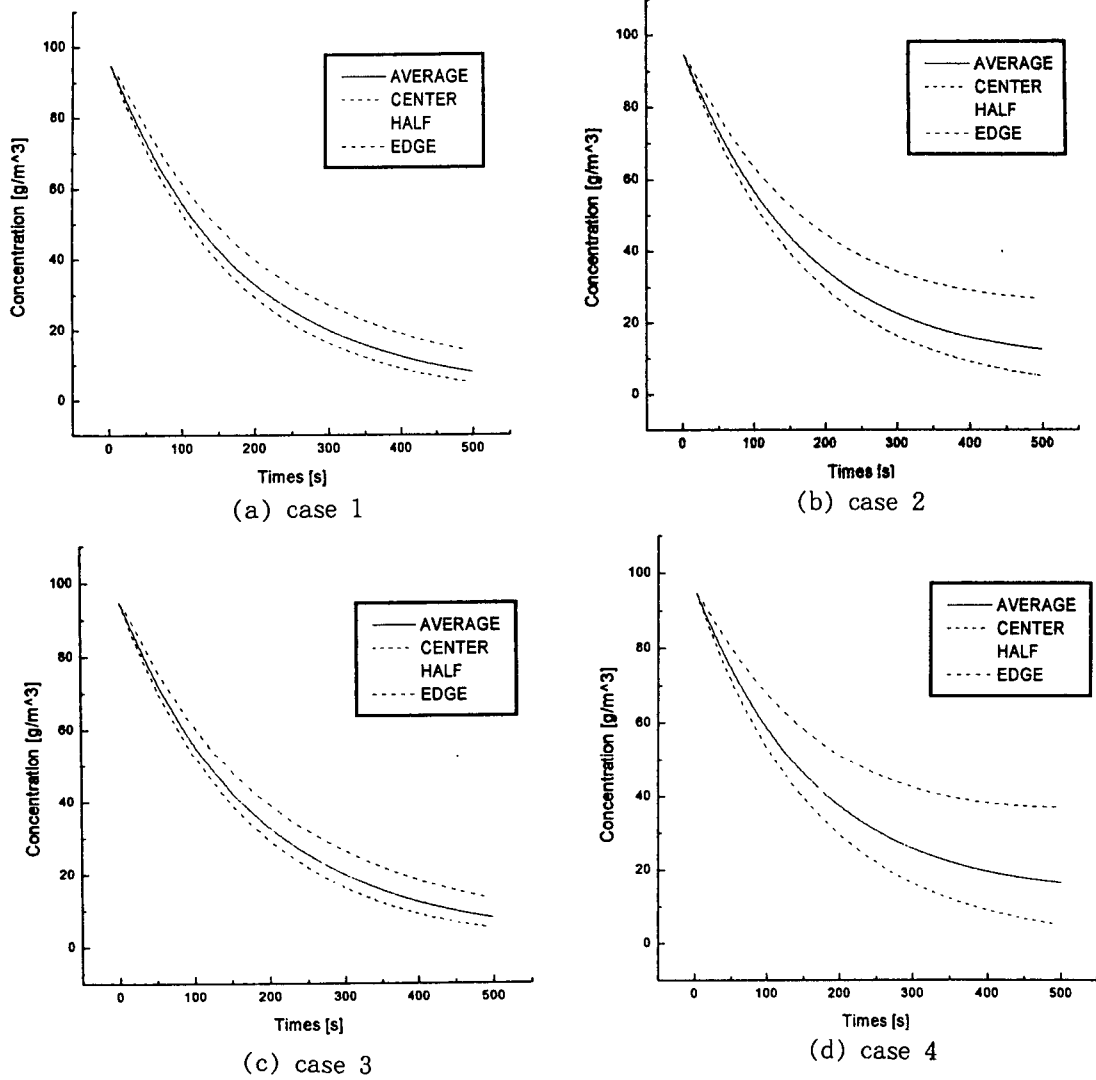


Fig. 5. Oxygen deposition rates at the growing surface.

자유표면에서 반경방향으로 나타나는 큰 온도구배가 자유표면에서의 thermocapillary flow를 야기하고 있는데 이 유동을 억제하는 원심력의 효과는 도가니와 성장결정의 회전 각속도에 따라 차등적으로 나타나고 있다. 이 원심력에 가장 큰 영향을 주는 인자는 도가니의 회전속도이며 이 회전속도가 Czochralski 결정성장 과정에서 속도장, 온도장, 농도장에 큰 영향을 주고 있다.

도가니의 회전속도가 비교적 클 때에는 성장결정의 회전이 결정성장으로의 산소의 전달현상에 큰 영향을 주지 못하고 있다. 한편 도가니의 회전속도가 작을 때에는 이 도가니의 회전방향과 같은 방향으로 성장결정이 회전할 경우에, 자유표면 근처의 유동장에서 원심력이 효과적으로 발생한다.

본 연구에서 얻어진 비정상상태에서의 산소의 농도분포에 관한 결과는 성장결정으로

흡수되는 산소의 균질성과 절대량에 관한 연구에 큰 공헌을 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] K. Hoshigawa, H. Kohda, H. Hirate and H. Nakanishi, Japanese Journal of Applied Physics 19 (1980) L-33.
- [2] K. Hoshigawa, H. Hirata, H. Nakanishi and K. Ikuda, Proc. 4th International Symposium on silicon Materials, Science and Technology, Minneapolis, Vol. on Semiconductor Silicon (1981) 101.
- [3] K.M. Kim, Journal of the Electrochemical Society 129 (1982) 427.
- [4] K.M. Kim, G.H. Schwuttke and P. Smetana, IBM Technical Disclosure Bulletin 24 (1981) 3376.
- [5] T. Suzuki, N. Isawa, Y. Okudo and K. Hoshi, Proc. 4th International Symposium on Silicon Materials, Science, and Technology, Minneapolis, Volume on Semiconductor Silicon (1981) 90.
- [6] W.E. Langlois and J.S. Walker, Proc. 2nd Int. Conf. on Computational and Asymptotic Methods for Boundary and Internal Layers (1982) 209.
- [7] N. Kobayashi and T. Arizumi, Japanese Journal of Applied Physics 9 (1970) 361.