

8인치 실리콘성장을 위한 커스프 MCZ계에서 축방향 산소분포에 대한 연구

이승철, 윤종규

서울대학교 금속공학과, 서울, 151-742

A numerical study on the optimum operation condition for axial oxygen concentration in 8 inch silicon growth by cusp MCZ

Seung-Cheol Lee and Jong-Kyu Yoon

Department of Metallurgical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

요 약 초크랄스키법에 의한 8인치 실리콘 단결정 성장계에 대칭과 비대칭 커스프 자장을 인가하여 결정을 성장시켰을 때 축방향으로 일정한 산소농도분포를 가질 수 있는 적절한 인가 자장의 크기와 비대칭도에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 결정이 성장할 때 커스프 자장의 형태가 유지되는 방법으로 도가니의 위치를 변화시키는 방법과 인가코일의 위치를 변화시키는 방법을 비교하였다. 대칭 커스프 자장이 인가된 경우, 축방향으로 일정한 산소농도를 얻을 수 있는 자장의 강도변화는 결정이 성장함에 따라 아래로 볼록한 형태를 띠었다. 축방향으로 일정한 산소농도분포를 갖기 위해 도가니의 위치를 변화시키는 방법과 코일의 위치를 변화시키는 방법을 비교한 결과 비슷한 산소농도의 표준편차값을 가짐을 알 수 있었다. 비대칭 자장이 인가된 경우, 축방향으로 일정한 산소농도 분포를 얻기 위해서는 비대칭도는 결정이 성장함에 따라 점차 증가하는 양상을 보였다.

Abstract A numerical study was conducted on the optimum magnetic field intensity and asymmetric factor for uniform axial oxygen concentration in 8 inch silicon single crystal growing process by magnetic Czochralski method. For constant shape of cusp field, a change of coil and crucible position were compared. In case of symmetric cusp field, magnetic field intensity variation shows concave downward with crystal growing for uniform

axial oxygen concentration. A numerical results show similar value of standard deviation of average oxygen concentration for uniform oxygen concentration between coil and crucible position change. In case of asymmetric cusp field, asymmetric factor is increased with crystal growing to have uniform oxygen concentration.

1. 서 론

현재 국내에서 생산되는 실리콘 단결정의 직경은 주로 8인치이며 향후, 성장시키는 단결정의 직경은 증가되어 직경 12인치의 단결정도 조만간 상품화가 될 전망이다. 성장시키려는 단결정의 직경이 증가하면 실리콘 액상의 유동은 점차 난류적인 특성을 띄게 된다. 난류 유동의 특성은 불규칙성, 높은 레이놀즈 수 그리고, 유동의 3차원적 특성[1]을 들 수 있다. 8인치 실리콘 단결정의 경우 레일리(Rayleigh) 수는 약 10^8 가량으로 난류적 특성을 갖고 있음이 알려져 있다[2]. 결정성장시 액상 실리콘의 난류적 특성이 성장된 결정의 품질에 미치는 주된 영향은 성장된 결정에서의 띄무니와 결정으로 혼입되는 산소농도의 국부적 불균일성 등이다[3].

이러한 액상의 난류적 특성을 억제하기 위해 결정성장계에 자기장을 인가하여 액상내의 난류를 억제하여 성장하는 결정의 품질을 개선하는 방법이 일반적으로 채택되고 있다. 자기장을 인가하는 방식중 가장 개선된 결과를 얻을 수 있는 방법은 커스프형 자기장이라 보고되고 있다[4].

그러나, 결정성장계에 커스프 자기장을 인가하여 실리콘 단결정을 성장시킬 때 결정성장초기에 대한 연구는 보고된 바 있으나[5] 결정이 성장하는 동안 축방향으로 일정한 산소농도분포를 얻을 수 있는 자장 강도변화에 대한 연구는 아직 보고된 바 없는 실정이다. 본 연구에서는 8인치 실리콘 단결정 성장계

에서 결정과 도가니의 회전수와 벽면 온도를 일정하게 유지한 후 인가자장을 변화시켜 결정이 성장함에 따라 축방향으로 일정한 산소농도 분포를 얻을 수 있는 자장의 변화에 대해 연구하였다.

2. 지배방정식과 경계조건

2.1. 액상유동의 지배방정식

본 연구에서 사용한 속도와 온도 등의 변수들에 대한 지배방정식은 이미 논문에 발표된 바 있으며[5] 간략히 정리하면 다음과 같다.

2차원 축대칭 계라고 가정하였으며 액상실리콘의 유동과 열전달을 지배하는 연속방정식과 일반 전달방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi \quad (2)$$

여기에서 ϕ 는 전달량 즉, 속도성분(u, v, w), 온도(T), 난류운동에너지(k), 난류에너지 소산을(ϵ) 그리고 액상실리콘내의 산소의 농도(C)를 의미한다. 그리고 ρ 는 액상실리콘의 밀도, Γ_ϕ 는 각 전달량에 대한 유효확산계수이며, S_ϕ 는 각 전달량의 원천항을 의미한다.

2.2. 저레이놀즈수 난류모델

본 연구에서는 자장에 의한 액상실리콘의 유동의 감쇄효과를 표현하기 위해 Jones와 Launder등[6]이 제안한 저레이놀즈수 난류 모델을 사용하였다. 표준 $k-\epsilon$ 난류모델은 액상의 유동이 완전한 난류일 때를 가정하여 제안된 모델식이므로, 본 연구와 같이 자장을 인가하지 않으면 액상의 유동이 난류적 특성을 띠고, 자장을 인가하면 천이영역 혹은 층류영역으로 유동의 특성이 변화하는 경우에는 유용한 방법이라 할 수 없다. 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델의 수송방정식은 다음 식 (3), (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \epsilon - 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_2 f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + 2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (4)$$

여기에서, f_μ , f_2 , R_t 와 같은 함수는 모델이 필요한 함수들이다. 식(3)과 (4)의 우변 마지막항은 표준 $k-\epsilon$ 난류모델에서 나타나지 않은 항으로서 액상의 유동의 강도가 감소할 때 점성소산을 표현하는 항이다. 본 연구에서 사용한 모델함수는 다음 식과 같다.

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

$$f_\mu = \exp \left[- \frac{3.4}{1 + R_t/50} \right] \quad (6)$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_t) \quad (7)$$

$$R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon} \quad (8)$$

2.3. 일반화된 전달 방정식

속도, 온도, 농도, 난류항들에 대한 일반전달 방정식은 다음 식 (9)로 나타낼 수 있으며 각각의 변수에 대한 원천항을 Table 1에 정리하였다.

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] + S_\phi \quad (9)$$

2.4. 경계조건

액상내에서는 대류와 전도에 의해 열전달이 일어나지만 결정표면, 액상표면 등에서는 주로 복사에 의한 열전달이 일어난다고 가정하였으며, 도가니 또는 결정 벽에 접한 유체의 속도는 벽속도와 같다고 가정하였다. 액상의 자유표면에서는 표면장력에 의한 전단응력이 발생하고 그 식은 다음과 같다.

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial r}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (10)$$

$\frac{\partial r}{\partial T}$: 열모세관 계수

난류운동에너지와 난류에너지 소산율의 경우 점성효과에 의한 액상유동의 감쇄를 나타내기 위해 벽에서의 난류운동에너지 k 를 0으로, 난류운동에너지 소산율 ϵ 방정식에서 $2 \frac{\mu \mu_t}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right)$ 항을 추가하여 벽에서의 k 의 변화를 나타낼 수 있도록 하였다. 그리고, k 방정식에 벽근처에서의 난류운동에너지 소산율을 나타낼 수 있는 D항 즉, $-2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_k} \right)^2$

Table 1
Definition of φ , Γ_φ and S_φ of the equations

φ	Γ_φ	S_φ
u	μ_e	$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(u \mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g$
v	μ_e	$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right)$
w	μ_e	$-\frac{2\mu_e v}{r^2} + \rho \frac{w^2}{r} - \frac{\partial P}{\partial r}$ $-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\mu_e w) + \frac{\mu_e}{r} \frac{\partial w}{\partial r} - \rho \frac{vw}{r} - \frac{\mu_e w}{r^2}$
T	$\frac{k_l}{C_p} + \frac{\mu}{\sigma_t}$	
C	$D_l + \frac{\mu}{S_d} \rho$	
k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho(\epsilon + D)$
ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (D_l G_k - C_2 \rho f_2 \epsilon) + E$

을 포함시켜 수치계산시 벽에서의 ϵ 을 0으로 하였다.

본 연구에서는 액상표면으로 전달된 산소가 SiO의 형태로 아주 빨리 증발한다는 가정하에 열모세관 계수의 값을 $-2.8 \times 10^{-4} (\text{N/m} \cdot \text{T})$ 로 사용하였다. 액상실리콘내에 불순물의 형태로 존재하는 산소의 원천은 석영도가니가 마모에 의한 것으로 액상실리콘으로 혼입된 산소는 대류 및 확산전달에 의해 성장계면으로 이동하고, 실리콘단결정으로 혼입된다. 액상실리콘에 혼입되는 산소의 경계조건으로는 다음과 같은 온도의존식을 사용하였다.

$$C_{wall} = 4 \times 10^{23} \exp(-2 \times 10^4/T) (\text{atoms/cm}^3) \quad (11)$$

표면에 도달한 산소는 모두 증발한다는 가

정하에 표면에서의 산소농도는 0으로 하였고, 성장계면으로 이동한 산소는 계면에서의 농도분포양상과 동일하게 결정으로 유입된다고 응고 가정하여 응고계면에서 산소의 평형분배계수(equilibrium distribution coefficient)는 1로 가정하였다.

계산에 사용한 물성치와 조업조건은 Table 2에 정리하였다.

3. 커스프 자기장의 계산

커스프자기장을 만드는 방법은 액상표면에 대칭으로 위치한 코일에 반대방향의 전류를 흘리면 된다.

보통의 경우 커스프 자기장은 액상표면에 대칭적으로 인가하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 도가니의 바닥에서 액상의 표면

Table 2
Thermophysical property for calculation

Conductivity(W/mK)	54.
Heat capacity(J/kgK)	1000.
Thermal expansion coefficient(K ⁻¹), β	1.41 × 10 ⁻⁴
Emissivity	0.318
Melting temperature(K)	1683
Viscosity(kg/m Dsec)	7 × 10 ⁻⁴
Magnetic field strength(Tesla)	0~0.4
Crystal radius(m), R_c	0.1016
Crucible Inner radius(m), R_c	0.2794
Crystal height(m), h_c	0.03~0.9
Melt height(m), h_c	0.211
Crystal rotation rate(rpm), W_s	6
Crucible rotation rate(rpm), W_c	-15

까지를 1로 정한 무차원 거리에 따라 무차원 거리가 0일 경우 보통의 커스프자기장배열이 된다. 다음 Fig. 1에 대칭 자장과 비대칭 자장의 인가방식에 대해 나타내었다.

커스프 자기장을 인가하였을 때 인가되는 전자기력은 원통형좌표계에서 전류흐름함수(electric current stream function), Ψ ,를 사용하여 다음과 같은 Ψ 에 관한 식을 얻는다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_i}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial z} (wB_z) + \frac{\partial}{\partial r} (wB_r) \quad (12)$$

석영도가니는 절연체로 가정하였고, 응고계면에서의 결정의 전기전도도 효과는 무시하였다. Ψ 는 액상의 대칭축과 두 개의 동심원의 대칭부분을 $\Psi=0$ 으로 설정하였다. 식 (12)에서 계산된 전류흐름함수를 사용하여 로렌츠힘을 계산하고 이렇게 계산된 로렌츠힘은 운동량방정식의 계산시 속도에 대한 원천항 S_θ 에 포함된다.

4. 수치적 가정과 모델링

결정의 반경은 일정하다고 가정하였으며 표면장력에 의해 발생하는 메니스커스(meniscus) 효과는 무시하였다. 응고계면은 약간의 곡률을 이루고 있으나 응고계면은 편평하다고 가정하였다. 난류는 등방성이라고 가정하였으며 다른 물성치들도 등방성을 가정하였다. 액상내의 용존산소의 분포는 대류에 의해 결정되고 용존산소가 액상실리콘의 유동에 미치는 영향은 무시하였다. 유체의 밀도는 부시네스크(Boussinesq)근사를 행하였다.(부시네스크근사란 밀도의 변화는 운동량 전달방정식 중 중력에 의한 밀도변화 항에만 고려하고, 다른 항에서는 밀도는 온도에 따라 선형적으로 변화한다는 가정이다.) 저 레이놀즈수 모델을 적용함에 따라 벽근처에서의 정확한 수치해석을 위해 벽과 인접한 그리드에서의 y^+ 값이 1이하가 되도록 그리드를 조밀하게 배치하였다.

결정 성장의 모사는 유사정상상태(Pseu-

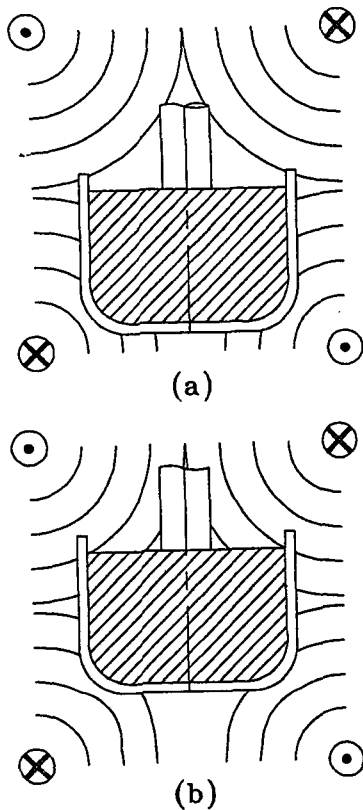


Fig. 1. Schematic diagram of symmetric and asymmetric cusp magnetic field configuration (a) symmetric field (b) asymmetric field.

do-Steady State)를 가정하여 결정이 시간에 따라 성장함을 모사하였다. 자기장이 인가되어 원하는 산소농도를 얻으려 할 경우 한 시간단계에서 수렴된 결과가 원하는 산소농도에 이르지 못하였을 때 인가되는 자기장의 강도가 변화하여 원하는 산소농도에 도달하게 한 후 다음 시간단계로 진행하도록 하였다.

전달방정식의 수치적 계산은 유한차분법중 검사체적법[7]을 사용하였다. 압력을 설명할 수 있는 방정식이 없는 관계로 운동량방정식과 연속방정식을 연립하여 압력을 간접적으

로 계산하는 SIMPLE(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation)알고리즘[7]을 사용하였다. 그리고, 속도와 압력간의 내삽이 필요없는 엇갈림 격자계(staggered grid system)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 여러 지배방정식은 모두 심한 비선형성을 띄고 있으며, 또한 서로 연결(coupling)되어있어 반복계산이 필요한데, 본 연구에서는 선형완화법(linear under-relaxation method)과 가상시간간격법(false time step method)을 적절히 혼합하여 계산하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 대칭 커스프 자장을 인가한 경우

대칭자기장이란 액상실리콘의 표면과 자기장을 인가하는 코일의 위치가 정확히 일치되어야 한다는 의미이다. 이것은 초기에 제안된 커스프자장의 인가방식으로서, 액상실리콘의 표면에서는 자기장의 성분이 0이 되도록 하려는 의도에서 비롯된 것이다. 이러한 배치가 초기에 제안된 이유는 불순물로서 혼입되는 산소의 경로를 추적해 보면 알 수 있다. 도가니에서 혼입된 산소는 액상실리콘의 벌크로 혼입되며 산소는 결정으로 혼입되거나 자유표면을 통해 주위 대기로 방출되게 된다. 커스프 자장을 인가하면 도가니 벽면에서의 액상의 유동을 크게 감소시켜 도가니에서 혼입되는 산소는 대류에 의한 전달이 지배적인 기구에서 확산이 지배적인 기구로 변화시키는 역할을 한다. 또한, 자유표면근처에서는 인가되는 자장의 강도가 0이 됨으로써 자기장에 의한 액상의 유동의 감소효과를 도가니 벽면에 비해 상대적으로 완화시킴으로써 자유표면근처에서는 대류에 의한 산소

의 물질전달이 일어나도록 하는 것이다. 이런 결과 도가니의 벽면에서는 산소가 확산에 의해 천천히 액상실리콘으로 혼입되고, 자유 표면에서는 대류에 의해 빠르게 방출됨으로 인해 결정으로 혼입되는 산소의 농도를 감소시키는 것이다. 결정성장계면 근처에서는 인가되는 자장의 강도가 도가니에 비해 상대적으로 약하기 때문에 결정의 회전에 의한 액상의 혼합효과가 증대되어 결정으로 혼입되는 산소의 농도가 균일하게 된다.

Fig. 2는 인가되는 자장의 강도가 최대 2000G인 경우 실리콘 단결정이 성장하면서 액상실리콘의 유선의 변화를 나타낸 것이다. 이때 도가니 측면 벽과 도가니 하부벽면의 유선은 액상의 자유표면에 비해 상대적으로 유선사이의 폭이 커져 유선의 강도가 약해지고, 기울기가 완만해지고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 같이 결정이 성장하더라도 도가니 벽면과 자유표면 근처의 유선양상은 계속 유지, 존속되는 것을 알 수 있다. 그러므로, 결정이 성장하면서 액상과 도가니의 접촉면적이 감소하면 결정으로 혼입되는 산소의 농도는 선형적으로 감소할 것이 예측된다.

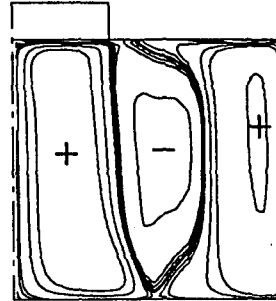
결정이 성장함에 따라 산소의 농도가 선형적으로 감소하므로 축방향으로 일정한 산소농도 분포를 얻기 위해서는 인가되는 자장의 강도를 변화시킬 필요가 있다. 커스프 자장을 인가할 때 결정이 성장하여 도가니 액상의 양이 감소하더라도 액상의 표면에는 자장의 강도가 0이 되어야 한다. 이때 가능한 방법으로는 도가니의 위치를 변화시키는 방법과 코일의 위치를 변화시키는 방법이 있다.

5.1.1. 도가니의 위치변화

먼저, 도가니의 위치를 변화시켜 대칭 커

$$\Psi_{\text{MAX}} = 55.37630$$

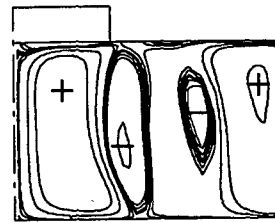
$$\Psi_{\text{MIN}} = -7.52448$$



(a)

$$\Psi_{\text{MAX}} = 56.45090$$

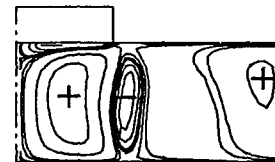
$$\Psi_{\text{MIN}} = -6.32887$$



(b)

$$\Psi_{\text{MAX}} = 59.91730$$

$$\Psi_{\text{MIN}} = -6.59564$$



(c)

Fig. 2. Variation of streamline contours with crystal growing when $B = 2000\text{G}$
 (a) $H_{\text{cry}} = 3\text{ cm}$ (b) $H_{\text{cry}} = 50\text{ cm}$
 (c) $H_{\text{cry}} = 90\text{ cm}$.

스프 자장 환경을 만든 후 결정을 성장시킬 때 축방향으로 일정한 산소농도를 갖도록 인가되는 자장의 강도를 변화시켰다.

Fig. 3에 액상실리콘에 인가되는 최대 자장의 크기의 변화를 나타내었다. 먼저 수정이 되기전 액상에 인가되는 자장의 크기는 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 이것은 코일의 배치가 일정하게 유지되면서 도가니의 위치는 상승하기 때문에 액상실리콘과 코일의 거리는 멀어지게 되고 따라서, 최대 자장의 크기는 거리에 따라 점차 감소하기 때문이다. 그리고, 수정후의 최대자장의 변화는 도가니 회전수의 변화와는 달리 인가되는 최대자장의 크기는 점차 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보인다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 인가되는 자장의 강도가 감소하면서 도가니벽면에서의 유동의 감쇄 효과가 감소하므로 결정으로 혼입되는 산소의 양이 점차 증가하기 때문이다. 결정이 약 55 cm 성장할 때 까지 유동의 증가로 인해 인가되는 자장의 강도는 감소한다. 그러나, 그 이상의 영역에서는 인가되는 자장의 강도가 다시 증가하는데 이것은 결정의 성장에 따라 액상 실리콘의 높이는 점차 감소하고 결정이 특정한 높이를 넘어서면 결정에 의한 인상효과(pull-

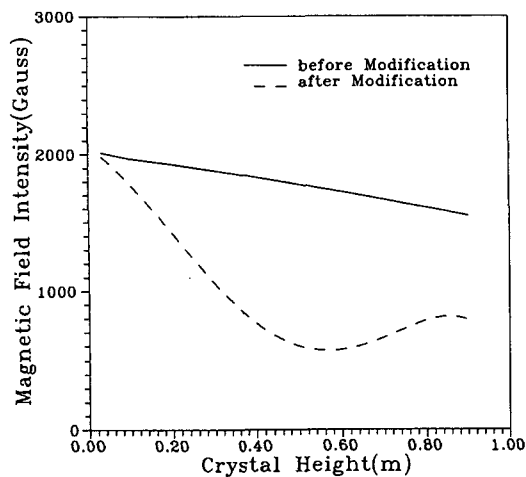


Fig. 3. Variation of magnetic field intensity according as crystal grows when crucible position is changed.

ing effect)가 자기장의 감소에 따른 농도의 증가폭보다 증가하고 그 결과 결정으로 혼입되는 산소의 농도가 증가하게 된다. 이러한 이유로 인해 인가되는 자기장의 강도가 증가해야 결정으로 혼입되는 산소의 농도를 일정하게 유지시킬 수 있다. 이것이 자기장을 인가하지 않은 경우에는 도가니의 회전수가 일정하게 증가하는 양상을 보이는데 반해 대칭 커스프 자장을 인가할 경우 극소점이 생기는 원인이다.

5.1.2. 코일의 위치변화

도가니의 위치를 변화시킬 경우 코일의 위치는 일정하게 유지되기 때문에 도가니의 위치가 변화하면 도가니와 코일의 거리는 증가하고 따라서 액상실리콘에 인가되는 최대자장의 크기는 감소하는 경향을 띤다. 이에 비해 코일의 위치가 변화하면 상대적으로 도가니는 고정되어 있으며 코일과 도가니의 거리는 일정하게 유지된다. 따라서, 액상실리콘에는 상대적으로 강한 자장이 인가되고 따라서 강한 자장으로 인해 축방향의 산소농도는 더욱 감소하게 되는 경향을 가진다. 따라서, 도가니의 위치를 변화시키는 방법에 비해 코일의 위치를 변화시키는 방법이 더 낮은 산소농도 분포를 갖는다. Fig. 4에 축방향으로 일정한 산소농도분포를 갖기 위한 자장의 변화를 나타내었다. 코일의 위치를 변화시키는 방법 또한 도가니의 위치를 변화시키는 방법과 유사한 자장의 분포를 갖는 것을 알 수 있다. 즉, 인가되는 자장의 강도가 점차 감소하는 경향을 보이다가 어느 최저점 이상에서 다시 증가하는 양상을 보인다. 이 현상 또한 결정이 성장함에 따라 결정의 회전에 의한 인상효과(pulling effect)때문인 것으로 생각된다.

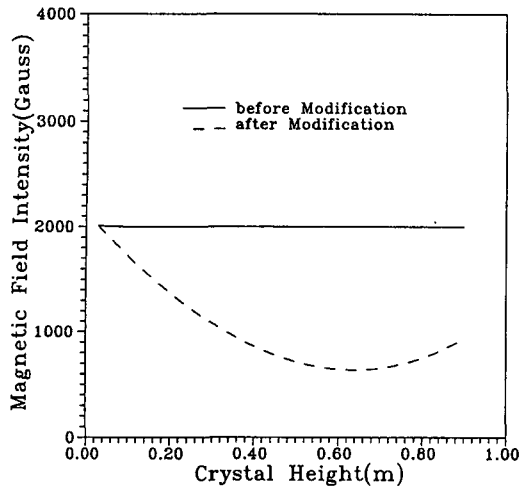


Fig. 4. Variation of magnetic field intensity in axial direction with/without modification when coil position is changed.

5.1.3. 코일과 도가니 위치 변화방법의 비교

Fig. 5는 축방향으로 산소농도가 일정하게 유지되는 것이 아니라 코일에 흐르는 전류의 강도만 일정하게 유지한 경우 축방향 산소농도의 표준편차를 비교하였다. 여기에서는 코일의 위치를 변화시키는 방법이 도가니의 위치를 변화시키는 방법에 비해 더 낮은 표준편차 값을 가진다. 이것은 도가니의 위치를 변화시키는 방법에 비해 코일의 위치를 변화시키는 방법이 액상실리콘 내의 자장의 강도는 더 크고, 그럼에 따라 커스프 자장에 의한 도가니 벽면에서 액상실리콘으로 혼입되는 산소의 확산에 대한 기여도가 더 크게 되기 때문이다. 그러므로, 코일의 위치를 변화시키는 방법이 도가니의 위치를 변화시키는 방법에 비해 상대적으로 더 낮은 산소농도분포와 더 작은 표준편차 값을 가지게 된다.

그러나, 축방향으로 일정한 산소농도분포를 가지는 경우에는 표준편차의 값이 두 방법 공히 비슷한 표준편차의 값을 가지게 되는데 Fig. 6에 일정한 산소농도분포를 얻을

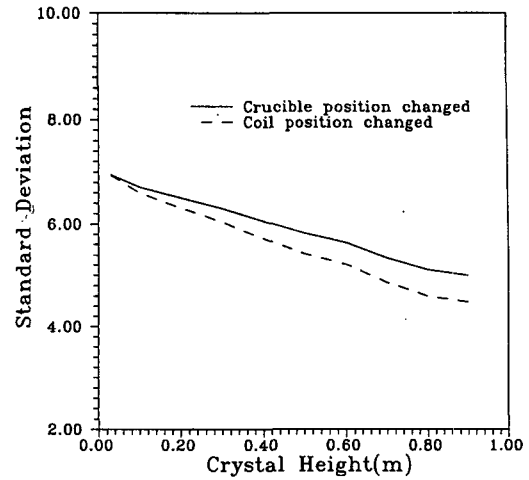


Fig. 5. Comparison of standard deviation of oxygen between crucible and coil position is changed when magnetic field is induced.

경우 두 방법의 표준편차 값을 결정의 높이에 따라 비교하였다. 두 방법 공히 유사한 자장강도의 변화를 보이고 또한, 인가되는 자장의 강도가 큰 차이가 나지 않기 때문에 표준편차의 값에는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 생각된다.

초크랄스키법에 의한 단결정성장시 대칭 커스프 자장이 인가된 상태에서 결정의 축방향으로의 일정한 산소농도 분포를 얻기 위한 자장의 강도변화는 결정이 성장함에 따라 최소점까지는 감소하는 경향을 보이다가 최소점을 지난 후 다시 인가되는 자장의 강도를 증가시켜야 한다는 것을 알 수 있었다. 그리고, 대칭 커스프 자장을 인가할 경우 축방향으로 일정한 산소농도분포를 얻을 경우 도가니의 위치를 변화시키는 방법이나 코일의 위치를 변화시키는 방법 공히 산소농도의 균일성에 있어서는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

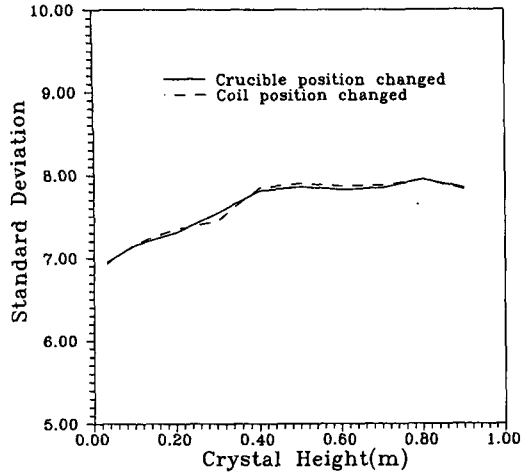


Fig. 6. Comparison of standard deviation of oxygen between crucible and coil position is changed when concentration is axially uniform.

5.2. 비대칭 커스프 자장을 인가한 경우

대칭 커스프 자기장의 효과는 도가니 벽면에서 혼입된 산소가 대류에 의한 물질전달보다는 확산에 의한 물질전달이 더 지배적인 전달기구가 되도록 하며, 액상실리콘의 표면에서는 자기장의 성분이 없도록 하여 증발되는 기구는 상대적으로 대류에 의한 물질전달이 지배적인 기구가 되도록 하는데 있다. 그러나, 결정이 성장함에 따라 일정한 자장이 계속 인가되면 결정으로 혼입되는 산소의 농도는 계속 감소하게 되므로 자장의 세기를 결정이 성장함에 따라 점차 감소시켜주어야 축방향으로 일정한 산소농도분포를 얻을 수 있다. 또 다른 방법으로는 자장의 세기를 변화시키지 않고 결정성장표면에 비대칭도만 증가시켜 결정이 성장함에 따라 축방향으로 일정한 산소농도 분포를 코일에 흐르는 전류를 감소시켜 자장을 줄임으로써 결정으로 혼입되는 산소의 농도를 일정하게 유지시키는

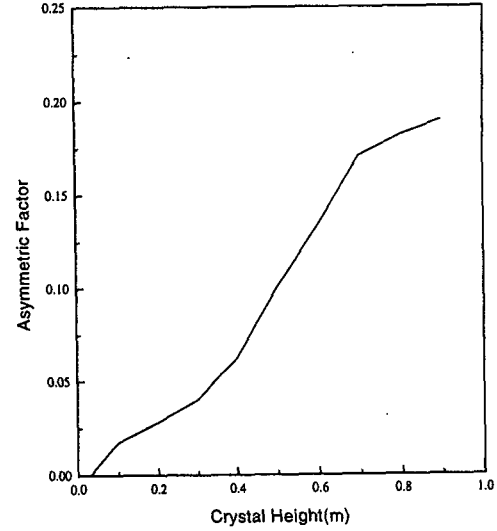


Fig. 7. Variation of asymmetric factor with crystal growing by crucible position is changed when magnetic field is 2000G.

방법이 있다. 비대칭 커스프 자장이 인가되면 도가니 벽면에서의 유동의 감쇄효과는 여전히 그대로 존재하는데 비해 액상의 자유표면에서의 유동을 억제시키게 되어 액상의 자유표면 근처의 산소의 전달이 대류에 의한 전달보다는 확산에 의해 전달되도록 하는 효과가 있다. 결정성장초기의 결과에 대해서는 이미 발표한 바 있다.

5.2.1. 도가니 위치변화

Fig. 7은 균일한 산소농도의 분포를 얻기 위한 비대칭도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 에서 나타난 비대칭도는 전체 도가니의 높이에 대해 코일의 대칭축의 위치를 액상의 자유표면에서 기초하여 계산한 무차원 거리에 해당하는 것이다. Fig.에서 알 수 있듯이 비대칭도는 결정성장 초기 0.0에서 결정성장 말기 약 0.17까지 일정하게 증가하는 양상을 보임을 알 수 있는데 이것은 표준 자장이 2000G로서 결정이 성장하여 60 cm이상이

되더라도 강한 자장의 효과 때문에 결정의 회전으로 인한 인상효과는 도가니의 하부 바닥면까지 미치지 못하는 것을 의미한다. 이런 이유로 인해 대칭 커스프 자장의 경우 나타났던 임계 최소값은 여기에서 나타나지 않았다. 표준자장의 강도가 약해지면 인상효과는 나타날 것으로 예측되고 이런 경우 비대칭도 변화의 경향은 다소 달라질 것으로 생각된다.

5.2.2. 코일 위치변화

Fig. 8에는 코일의 위치를 변화시켰을 경우 축방향으로 일정한 산소농도를 얻기 위한 비대칭도의 변화를 나타내었다. Fig.에서 알 수 있듯이 비대칭도의 변화량이 도가니의 위치를 변화시키는 방법에 비해 큰 것을 알 수 있다. 이것은 코일의 위치를 변화시키면 결정성장계에 더욱 강한 자장이 인가되므로 결정으로 혼입되는 산소의 농도가 감소하는 효과를 상쇄하기 위해 비대칭도를 증가시켜야 하기 때문이다.

많은 조업에서는 전류의 강도를 변화시키는 방법보다는 로내부의 기하학적인 형상을 변화시키는 것이 경제적으로나 제어의 측면에서 용이한 장점이 있다. 이제까지의 연구에서는 주로 대칭 커스프자장에 대한 내용이 주가 되었지만 본 연구에서 볼 수 있는 바와 같이 코일 또는 도가니의 위치를 상대적으로 약간만 변화시켜준다면 원하는 비대칭도와 원하는 산소농도를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

6. 결 론

8인치 단결정 성장계에 자기장을 인가할 경우 축방향으로 일정한 산소농도를 얻기 위

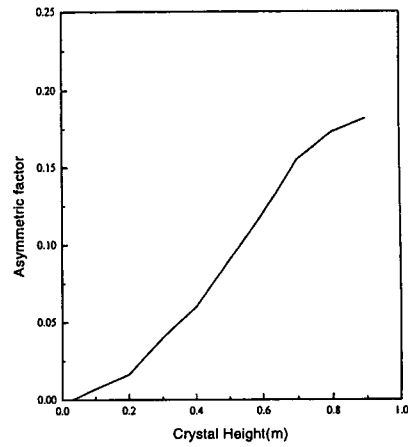


Fig. 8. Variation of asymmetric factor with crystal growing by coil position is changed moved when magnetic field is 2000G.

한 방법 두 가지를 비교하였다. 대칭 자장을 인가하여 자장의 강도를 감소시키면서 일정한 산소를 얻는 방법과 일정한 자장의 강도에서 비대칭도를 증가시켜 축방향으로 일정한 산소농도분포를 얻는 방법이 그것이다. 각 방법에 대해 축방향으로 일정한 산소농도분포를 가질 때 얻을 수 있는 결론은 다음과 같다.

1) 대칭 자장을 인가하였을 때 축방향으로 일정한 산소농도분포를 얻기 위해서는 자장을 인가하지 않은 경우와는 달리 최소값이 존재하였다. 이것은 결정이 성장하고 액상실리콘의 양이 감소함에 따라 결정의 회전에 의한 pulling effect가 도가니의 바닥면에 직접 접할 수 있으므로 해서 이러한 효과를 없애기 위해 최소값에서 다시 증가하는 양상을 보인 것으로 생각된다.

2) 대칭 자장을 인가할 때 도가니의 위치와 코일의 위치를 변화시키는 방법 모두에 대해 고찰하였다. 두 방법중 코일의 위치를 변화시키는 방법이 축방향의 균일성을 고려

하지 않은 경우에는 우수한 것으로 생각되거나 축방향의 균일성을 고려한 경우에는 두 방법 모두 비슷한 표준편차값을 나타내었다. 축방향으로 일정한 산소농도를 얻기 위해서는 두 방법중 어느 방법을 사용하여도 무방할 것으로 생각된다.

3) 일정한 자장하에서 비대칭도의 증가를 통해 축방향으로 일정한 산소농도의 분포를 얻을 수 있었다. 비대칭도는 도가니의 경우와 마찬가지로 일정하게 증가하는 것을 알 수 있었으며 이것은 인가되는 자장의 강도가 커 결정의 회전에 의한 pulling effect가 억제되기 때문으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 교육부 신소재분야 연구지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Tennekes, H. and J. L. Lumley, A First Course in Turbulence, (MIT press, England, 1972).
- [2] 이승철, CZ법에 의한 8인치 실리콘 단결정 성장시 자장의 영향에 관한 연구, 서울대학교 석사학위논문 (1995).
- [3] Hurle, D. T. J. and B. Cockayne, Handbook of Crystal Growth, D. T. J. Hurle eds, (North-Holland, New York, 1993).
- [4] 정형태, 초크랄스키법에 의한 실리콘 단결정 성장시 유동 및 물질전달에 관한 수치해석적 연구, 서울대학교 박사학위 논문 (1994).
- [5] 이승철, 정형태, 윤종규, 한국결정성장학회지 6 (1996).
- [6] Jones, W. P. and B. E. Launder, Int, J. Heat Mass Transfer 15 (1972) 301.
- [7] Patankar, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere (1980).