

초크랄스키법에 의한 8인치 실리콘 단결정 성장시 비대칭 커스프자장의 영향에 관한 연구

이승철, 정형태*, 윤종규

서울대학교 금속공학과, 서울, 151-742

*산업과학기술연구소, 포항, 790-600

A numerical study on the effects of the asymmetric cusp magnetic field in 8 inch silicon single crystal growth by Czochralski method

Seung-Cheol Lee, Hyung-Tae Chung* and Jong-Kyu Yoon

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

* Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-600, Korea

요 약 초크랄스키법에 의한 8인치 실리콘 단결정 성장시 커스프자장의 영향에 관한 수치 해석적 연구를 행하였다. 액상실리콘의 유동에 대한 모델은 저레이놀즈수 모델을 사용하였다. 대칭커스프자장은 유선의 강도를 감쇄하였고, 특히 도가니 벽면 근처에서의 유동의 감쇄효과가 현저하였다. 결정으로 혼입되는 산소의 농도는 인가되는 커스프자장의 증가에 따라 감소하였다. 그리고, 결정으로 혼입되는 산소농도의 균일성은 향상되었다. 비대칭커스프 자장은 결정으로 혼입되는 산소의 농도를 증가시켰지만, 반경방향의 산소농도의 분포는 일정하게 유지되었다. 대칭과 비대칭 커스프자장의 적절한 조합을 행하면 축방향으로 일정한 산소의 분포를 갖는 적절한 조업조건이 도출될 것으로 예상된다.

Abstract A numerical study was conducted on the effects of the cusp magnetic field in 8" silicon single crystal growth by Czochralski method. For a damping effects simulation by magnetic field, low Reynolds number $k-\epsilon$ model was adopted. Symmetric cusp magnetic field has a effect of damping streamline intensity especially, near the crucible wall. Oxygen concentration, which is incorporated into crystal, is lowered with the increasing cusp magnetic field intensity. The uniformity of the oxygen concentration was improved. The asymmetric cusp magnetic field

increased the oxygen concentration however, oxygen concentration distribution in the radial direction was remained uniform. Suitable combination of symmetric and asymmetric cusp magnetic fields could give uniform and low oxygen concentration in the axial direction.

1. 서 론

단결정으로 성장된 반도체 재료는 현재 그 개념이 구체화되고 있는 정보화 사회에서 핵심이 되는 재료중의 하나이다. 그리고, 실제 산업계에서 사용되는 단결정의 80 % 이상이 실리콘 단결정이다.

실리콘 단결정을 성장시키는 방법중 초크랄스키(Czochralski)법에 의한 단결정 성장이 총 실리콘 단결정 성장량 중 약 90 % 가량을 차지하고 있다.

현재, 국내에서 초크랄스키법으로 실리콘 단결정을 성장시키는 경우 직경 6인치 단결정이 대부분 생산되고 있으며, 근래에는 수율을 높이기 위해 점차 8인치 단결정을 성장시키려 하고 있다. 또한, 성장된 단결정의 품질을 높이기 위해 단결정 내의 불순물 분포를 낮게 그리고 균일하게 유지시키기 위하여 단결정 성장계에 자기장을 인가하려는 연구가 진행되고 있다. 현재 국내에서는 6인치의 결정 성장계를 대상으로 커스프 자기장이 유동 및 농도에 미치는 효과와 적정 조업 시작 조건을 수치적으로 예측한 연구[1]가 있다.

초크랄스키법에 의한 실리콘 단결정 성장 공정은 그 특성상 밀폐된 로내에서 고온(액상 실리콘의 온도 1410~1500°C)으로 성장이 이루어지기 때문에 성장된 단결정의 품질에 결정적인 영향을 미치는 액상내의 유동은 실험에 의해 접근하기 어려우며 실험적으로 진행된 연구도 직경 3인치의 단결정 성장계에 X-선등을 조사[2]하거나 추적자(tracer)를 통해 액상의 유동현상을 연구[3]하거나

실리콘 단결정 성장계에 열전대(thermocouple)를 사용하여 액상내의 온도요동을 측정하는 방법[4]들이 제안, 연구되고 있다. 그러나 실험에 의한 접근방법은 아직 소구경 성장계에 국한되어 있고, 실제 산업현장에서 필요로 하는 대구경 단결정 성장계내 액상의 유동[5]에 대해서는 발표된 연구는 많지 않은 실정이다. 그래서 제안된 방법이 수치적 방법에 의해 액상내의 열 및 물질 전달현상을 이해하는 것이다.

본 연구에서는 유한체적법[6]을 이용해 8인치 실리콘 단결정계에 자기장을 인가하지 않았을 경우와 자기장을 인가한 경우 조업변수의 변화에 따른 액상 실리콘 내의 운동량 전달, 열 전달 그리고 물질전달 등에 미치는 효과에 대해서 연구하였다.

2. 지배방정식과 경계조건

2.1. 액상유동의 지배방정식

초크랄스키법에 의한 단결정 성장계는 2차원 축대칭계라고 가정하였으며 액상실리콘의 유동을 지배하는 연속 방정식과 일반 전달 방정식을 벡터형으로 나타내면 다음과 같다.

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

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

여기에서 ϕ 는 전달량 즉, 속도성분(u, v, w), 온도(T), 난류 운동 에너지(k), 난류에너지 소산율(ϵ) 그리고 액상 실리콘내의 산소의 농도(C)를 의미한다. 그리고 ρ 는 액상 실리콘의 밀도, Γ_ϕ 는 각 전달량에 대한 유효확산 계수이며, S_ϕ 는 각 전달량의 원천항을 의미한다.

2.2. 저레이놀즈수 난류모델

초크랄스키 시스템의 경우 레이놀즈수는

$$Re_c = \frac{W_{cu} r_m^2 \rho}{\mu} \quad (3)$$

와 같이 정의된다. 여기에서 W_{cu} 는 도가니의 반경방향 회전속도를 의미하고, r_m^2 은 도가니의 반경을 의미한다. 8인치 시스템의 경우 레이놀즈수는 약 10^6 가량으로 액상 실리콘내의 유동양상은 강한 난류적 특성을 갖고 있다[7]. 그런데 이 단결정 성장계에 자기장을 인가할 경우 유동이 억제되어 국부레이놀즈수(Local Reynolds number) 역시 감소하게 된다. 따라서 자기장을 인가하지 않은 경우 액상의 유동은 강한 난류적 특성을 띄고, 자기장을 인가할 경우 천이영역 또는 층류영역으로 결정 성장계 내의 유동의 특성은 변화하게 되어 이제까지 대구경 단결정 성장계에 대한 수치모상에 많이 적용되던 표준 $k-\epsilon$ 난류모델은 그 적용범위에 있어 한계를 가지게 된다. 왜냐하면, 표준 $k-\epsilon$ 난류모델은 충분히 발달한 난류를 가정하여 유체의 유동을 해석하기 위해 제안된 모델이기 때문이다. 본 연구에서는 저레이놀즈수 난류 모델[8]을 채택하여 유동의 특성이 강한 난류적 특성을 띤 계에서 층류적 특성을 띤 계까지 적절히 모사할 수 있도록 하였다.

저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 난류모델의 수송 방정

식은 다음과 같다. f_μ , f_2 , R_1 와 같은 함수는 모델이 필요한 함수로서 Jones와 Launder [8]의 모델함수를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \\ &\quad \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \epsilon - 2\mu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] \\ &\quad + C_1 \mu_t \frac{\epsilon}{k} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \\ &\quad - C_2 f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} + 2\mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_i} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$f_\mu = \exp \left[- \frac{3.4}{1 + R_\mu/50} \right] \quad (7)$$

$$f_2 = 1 - 0.3 \exp(-R_2^2) \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon} \quad (9)$$

2.3. 일반화된 전달 방정식

속도, 온도, 농도, 난류항들에 대한 일반 전달 방정식은 다음 식(10)으로 나타낼 수 있으며 각각의 변수에 대한 원천 항을 Table 1에 정리하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (\rho u \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v \phi) \\ = \frac{\partial}{\partial z} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] + S_\phi \end{aligned} \quad (10)$$

Table 1

Definition of ϕ , Γ_ϕ and S_ϕ of the equations

ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
u	μ_e	$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} - \rho g$
v	μ_e	$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_e \frac{\partial v}{\partial r} \right)$
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	$\frac{k_1}{C_p} + \frac{\mu_1}{\sigma_1}$	
C	$D_1 + \frac{\mu_1}{SC_1} \rho$	
k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G_k - \rho(\varepsilon + D)$
ε	$\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho f_2 \varepsilon) + E$

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.

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial r}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (11)$$

$\frac{\partial r}{\partial T}$: 열모세관계수

표준 k - ε 난류모델의 경계조건은 경험적인 벽함수[9]를 사용해 벽에서의 점성효과를 반영하지만 저레이놀즈수 난류모델에서는 점성효과에 의한 액상유동의 감쇄를 지배 방정식에서 반영할 수 있도록 하였다. 그래서, 벽에서의 난류 운동 에너지 k 를 0으로, 난류 운동 에너지 소산율 ε 방정식에서 $2 \frac{\mu \mu_1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)$ 항을 추가하여 벽에서의 k 의 변화를 만족스럽게 나타낼 수 있도록 하였다. 그리고 k 방정식에 벽 근처에서의 난류 운동 에너지 소산율을 나타낼 수 있는 D 항 즉, $-2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_k} \right)^2$ 을 포함시켜 수치 계산시 벽에서의 ε 을 0으로 하였다.

본 연구에서는 액상표면으로 전달된 산소가 SiO의 형태로 아주 빨리 증발한다는 가정하에 열모세관 계수의 값은 $-2.8 \times 10^{-4} (\text{N/m} \cdot \text{T})$ 을 사용하였다[10]. 액상 실리콘내에 불순물의 형태로 존재하는 산소의 원천은 석영 도가니가 마모에 의한 것으로 액상 실리콘으로 혼입된 산소는 대류 및 확산전달에 의해 성장계면으로 이동하고, 실리콘 단결정으로 혼입된다. 액상 실리콘에 혼입되는 산소의 경계조건으로는 다음과 같은 온도 의존식을 사용하였다.

$$C_{wall} = 4 \times 10^{23} \exp(-2 \times 10^4/T) (\text{atoms/cm}^3) \quad (12)$$

표면에 도달한 산소는 모두 증발한다는 가정하에 표면에서의 산소농도는 0으로 하였고, 성장계면으로 이동한 산소는 계면에서의

Table 2
Thermophysical property and operation condition 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
Melt height (m), h_c	0.211
Crystal rotation rate (rpm), W_s	3,6,9,12
Crucible rotation rate (rpm), W_c	-15, -18, -21, -24
Asymmetric factor	0.0, 0.25, 0.5

농도 분포 양상과 동일하게 결정으로 유입된다고 응고가정하여 응고계면에서 산소의 평형분배계수(equilibrium distribution coefficient)는 1로 가정하였다.

계산에 사용한 물성치와 조업조건은 Table 2에 정리하였다.

3. 커스프 자기장의 계산

커스프 자기장은 액상표면에 대칭으로 반대방향의 전류를 흘리면 형성된다. 대칭 자기장과 비대칭 자기장의 인가방식을 Fig. 1에 나타내었다.

보통의 경우 커스프 자기장은 액상표면에 대칭적으로 인가하는 것이 일반적이나, 본 연구에서는 도가니의 바닥에서 액상의 표면까지를 1로 정한 무차원 거리에 따라 무차원 거리 0일 경우 보통의 대칭적인 커스프 자기장 배열이 되고, 무차원 거리가 0.5일 때 까지 비대칭성의 증가에 따른 효과들을 연구하였다.

일반적으로 액상 전도체에 자기장을 인가하면 유도전류가 발생하고, 유도전류와 자기장의 상호작용의 결과로 로렌츠 힘이 발생하

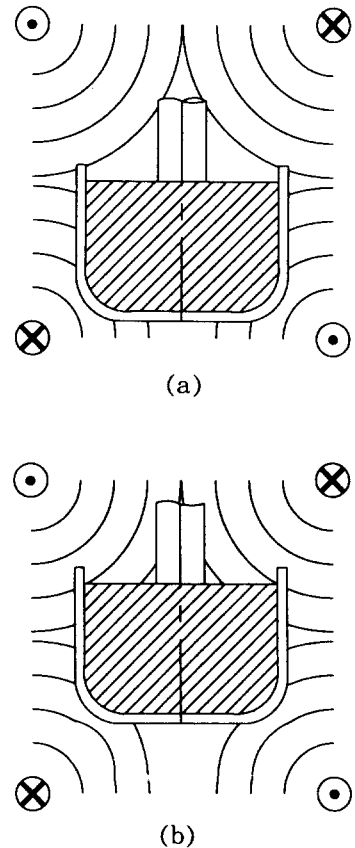


Fig. 1. Schematic diagram of symmetric and asymmetric cusp magnetic field configuration. (a) Symmetric field and (b) Asymmetric field.

게 된다. 그러므로, 액상에 유도된 자기력은 다음 식과 같다.

$$\vec{F} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (13)$$

$$\vec{J} = \sigma_m (-\nabla \phi_s + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (14)$$

\vec{B} : 자속밀도

σ_m : 액상의 전기전도도

ϕ_s : 스칼라포텐셜

커스프 자기장을 인가하였을 때 인가되는 전자기력은 원통형 좌표계에서 전류 흐름 함수(electric current stream function), Ψ_j 를 사용하여[11] 다음과 같은 Ψ_j 에 관한 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial^2 \Psi_j}{\partial z^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_j}{\partial r} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial z} (wB_z) + \frac{\partial}{\partial r} (wB_r) \end{aligned} \quad (15)$$

석영 도가니는 절연체로 가정하였고, 응고 계면에서의 결정의 전기 전도도 효과는 무시하였다. Ψ_j 는 액상의 대칭축과 두 개의 동심원의 대칭부분을 $\Psi_j = 0$ 으로 설정하였다. 자기레이놀즈수[12]는 식 (9)와 같이 정의되는데 그 의미는 자기장에 미치는 유동의 효과를 의미한다.

$$Re_m = \mu_m \sigma_m r^{2m} \Omega_{cru} \quad (16)$$

여기에서 μ_m 은 액상의 투자율, σ_m 은 도가니의 직경, 그리고 Ω_{cru} 은 도가니의 회전속도를 의미한다. 액상 실리콘의 경우 Re_m 은 1보다 매우 작은 값으로서 자기장에 미치는 유동의 효과는 무시하였다. 식 (8)을 사용해 전류 흐름 함수를 계산하면 원통형 좌표계에

서 커스프 자기장을 인가할 경우 발생하는 로렌츠 힘은 다음과 같다.

$$F_z = -\sigma_m B_r (uB_r - vB_z) \quad (17)$$

$$F_r = \sigma_m B_z (uB_r - vB_z) \quad (18)$$

$$F_\theta = -\frac{\sigma_m}{r} \left(B_r \frac{\partial \Psi_j}{\partial r} - vB_z \frac{\partial \Psi_j}{\partial z} \right) \quad (19)$$

이렇게 계산된 로렌츠 힘은 운동량 방정식의 계산시 속도에 대한 원천항 S_θ 으로 포함된다.

4. 수치적 가정과 모델링

결정의 반경은 일정하다고 가정하였으며 표면장력에 의해 발생하는 메니스커스(meniscus) 효과는 무시하였다. 응고계면은 약간의 곡률을 이루고 있으나 응고계면은 편평하다고 가정하였다. 저레이놀즈수 $k-\epsilon$ 모델의 사용시 난류는 등방성이라고 가정하였으며 다음 물성치들도 등방성을 가정하였다. 액상 내의 용존산소의 분포는 대류에 의해 결정되고 대류에는 영향을 미치지 못한다고 가정하였다. 유체의 경우 부시네스크(Boussinesq) 근사를 행하였다(부시네스크 근사란 밀도의 변화는 운동량 전달 방정식 중 중력에 의한 밀도변화 항에만 고려하고, 다른 항에서는 밀도는 온도에 따라 선형적으로 변화한다는 가정이다). 저레이놀즈수 모델을 적용함에 따라 벽근처에서의 정확한 수치해석을 위해 벽과 인접한 그리드에서의 y^+ 값이 1 이하가 되도록 그리드를 조밀하게 배치하였다.

전달방정식의 수치적 계산은 유한차분법중 검사체적법[6]을 사용하였다. 압력을 설명할 수 있는 방정식이 없는 관계로 운동량 방정

식과 연속 방정식을 연립하여 압력을 간접적으로 계산하는 SIMPLE(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equation) 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 여러 지배 방정식은 모두 심한 비선형성을 띄고 있으며, 또한 서로 연결(coupling)되어 있어 반복계산이 필요한데, 본 연구에서는 선형완화법(linear under-relaxation method)과 가상시간간격법(false time step method)을 적절히 혼합하여 계산하였다.

5. 결과 및 토의

5.1. 대칭 커스프 자기장 인가

도가니의 회전수는 6 rpm, 결정의 회전수는 -22 rpm으로 고정하고 인가되는 자장의 정도를 500 G에서 4000 G까지 증가시킬 때 유선의 변화의 양상을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 (+)는 시계반대방향의 순환류를 의미하고, (-)는 시계방향의 순환류를 의미한다. 도가니의 벽면을 따라 반시계방향으로 도가니의 하부에서 상부로 상승하는 순환류는 인가되는 자장의 강도가 증가하면 크게 감소해 인가되는 자장의 강도가 4000 G인 경우 거의 유동이 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 결정 아래 부분에 존재하는 순환류의 강도의 감소는 벽면의 감소효과보다 작게 되어 유동의 혼합효과는 도가니 벽면에 비해 상대적으로 활발함을 알 수 있다. 그리고 결정의 자유표면에서의 유동은 자기장의 강도의 변화에 큰 폭의 감소를 보이지 않고, 계속적으로 약간의 유선구배를 나타냄을 알 수 있다.

액상유동의 감소를 유선의 강도가 아닌 액상내의 최대 국부레이놀즈수의 변화를 통해

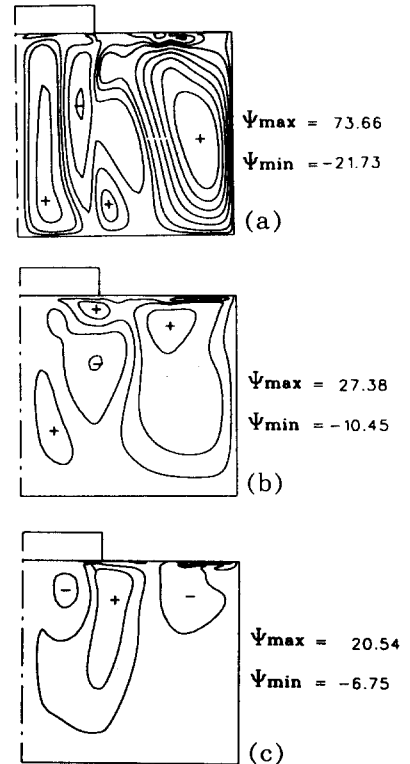


Fig. 2. Streamlines variations with magnetic field increasing when $W_{cru} = 6$ rpm, $W_{cry} = -22$ rpm, $X_c = 3$ cm : (a) $B = 0.05$ T, (b) $B = 0.2$ T and (c) $B = 0.4$ T.

알아본 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기에서 국부레이놀즈수란 $Re_t = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}$ 로 정의되는 수로서 레이놀즈수가 전체 유동의 특성을 나타내는 무차원 변수라 하면 국부레이놀즈수는 액상내에서 난류 운동에너지와 난류 에너지 소산율의 비로 나타난 국부적인 지역에서의 유동의 특성을 나타내는 무차원 변수라 할 수 있다. 자기장을 인가하지 않은 경우에 비해 자기장을 4000 G 인가하면 약 37% 감소함을 알 수 있다. 이것은 액상내의 난류의 강도가 그만큼의 비로 감소함을 의미한다.

결정으로 혼입되는 산소의 원천은 도가니의 벽면으로 알려져 있으므로 도가니 벽면에

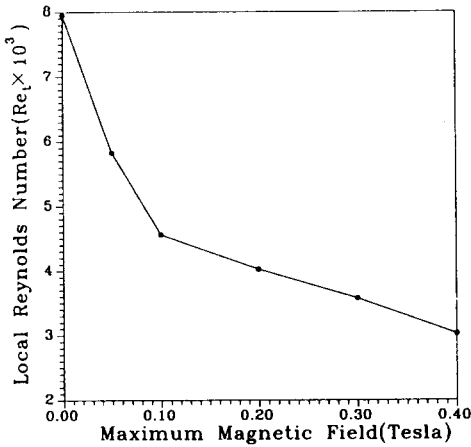


Fig. 3. Local Reynolds number variation with increasing magnetic field.

서의 유동이 크게 감소한다는 것은 먼저, 액상의 유동에 의해 도가니에서 깎여 들어가는 산소의 양이 감소하고, 두번째로 도가니의 벽면에서 혼입된 산소가 액상의 대류에 의해 전달된다기 보다는 액상내에서의 확산효과에 의해 전달되는 비율이 높아지게 됨을 의미하므로 액상내의 농도의 기울기는 크게 되고, 결정 근처에서의 산소의 농도는 감소하는 효과를 보이게 된다. Fig. 3에 결정에서 1 mm의 위치에서 액상의 산소의 농도를 규격화해 나타내었다. 인가되는 자장의 강도가 증가할수록 산소의 농도가 약 40% 가량 감소함을 알 수 있다. 또한 자장의 강도가 증가할수록 산소농도의 균일성이 향상됨을 알 수 있다. 이것은 이전의 실험결과와도 잘 일치하는 경향을 보인다. 즉, 커스프 자장을 인가할 경우 액상으로 혼입되는 산소의 농도를 감소시킬 수 있으며 또한 결정으로 혼입되는 산소농도의 균일성을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다. 그러나, 액상표면에서 성장축 방향으로의 자기장의 성분이 존재하지 않게 되므로 액상표면에서의 유동은 상대적으로 크게 남아있게 되고 이것은 액상표면으로 올라온 산

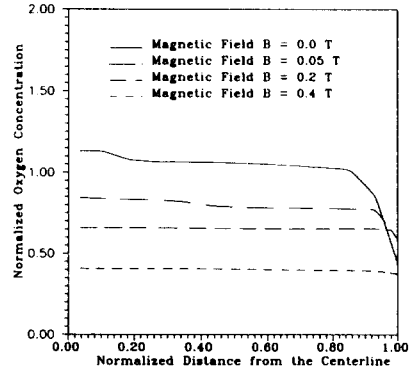


Fig. 4. Normalized oxygen concentration with increasing magnetic field intensity when $W_{cru} = 6$ rpm, $W_{cry} = -22$ rpm and $X_c = 3$ cm.

소가 증발하는 효과는 여전히 남아 있음을 의미한다.

5.2. 비대칭 커스프 자장의 인가

본 연구에서 비대칭 자장은 일반적인 커스프 자장의 경우, 액상 실리콘의 표면에 대칭적으로 두 개의 도선을 위치하게 하여 액상 표면에서의 결정 성장축 방향의 자기장의 성분이 존재하지 않게 하는 것임에 반해 액상표면과 도가니 하단벽 임의의 위치에 두 도선의 중심이 놓이도록하여 액상표면에 대칭적이지 않은 커스프 자장의 인가를 하게 됨을 의미한다.

Fig. 5에 비대칭성이 0.25일 때 인가되는 자장의 강도를 증가시킬 수 경우 액상유동의 변화를 나타내었다. 여기에서 비대칭성의 의미는 액상의 높이를 1로 정할 때 두 도선의 중심이 전체 액상의 높이의 0.25에 위치함을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 일단 자기장이 인가되면 두 도선의 중심이 위치하는 곳에서 액상의 유선이 두개의 순환류로 나뉘게 됨을 알 수 있으며 액상 표면에서의 유선

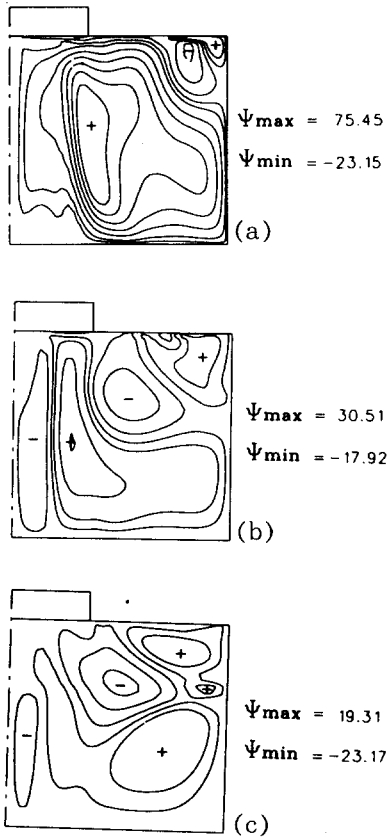


Fig. 5. Streamlines variations with magnetic field increasing with asymmetric factor is 0.25, $W_{cru} = 6$ rpm, $W_{cry} = -22$ rpm and $X_c = 3$ cm : (a) $B = 0.05$ T, (b) $B = 0.2$ T and (c) $B = 0.4$ T.

의 기울기가 크게 완화됨을 알 수 있다. 이것은 대칭 커스프 자장이 액상표면에서의 유동을 상대적으로 유지시킴에 비해 여기에서는 액상표면의 유동도 억제시키게 되며 이것은, 액상의 표면에서 증발되는 산소의 양을 감소시킴을 의미한다. 그 결과 액상내에 존재하는 산소의 양을 증가시켜 결정으로 혼입되는 산소의 양을 증가시킬 수 있다.

Fig. 6에 자장의 2000 G로 일정하게 유지시키고 비대칭성을 증가시켰을 때 결정에서

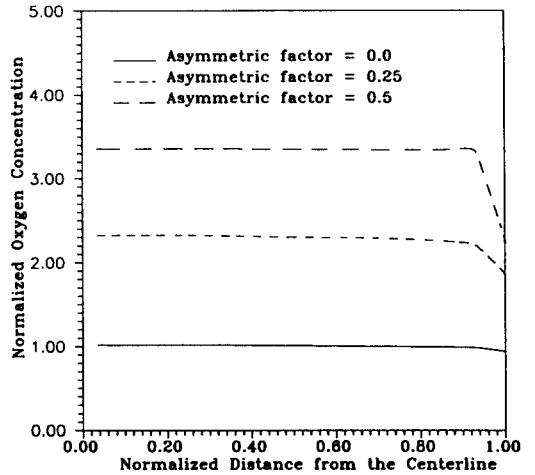


Fig. 6. Normalized oxygen concentration profiles with asymmetric factor variation when $W_{cru} = 6$ rpm, $W_{cry} = -22$ rpm and $B = 0.2$ T.

1 mm 아래의 산소의 농도를 나타낸 것이다. 비대칭성이 증가할수록 산소의 농도가 증가함을 알 수 있다. 결정의 끝부분에서 산소의 농도가 급격히 감소함을 알 수 있는데 이것은 액상표면에서의 산소의 경계조건에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 액상표면에 도착한 산소는 모든 양이 증발된다는 경계조건 때문에 지나친 농도의 감소가 일어나는 것으로 생각된다. 그림에서 알 수 있듯이 일정한 자기장에서 비대칭성을 증가시키면 결정으로 혼입될 산소의 농도가 증가하나 균일성은 약간 나아지는 경향을 보이고 있다.

이러한 결과는 결정 또는 도가니의 회전 없이 있을 경우 산소의 농도는 축방향으로 점차 감소하게 되는데[13], 보통의 경우 도가니의 회전수를 증가시키므로써 이러한 축방향 산소농도의 감소효과를 상쇄하게 되지만, 커스프 자장을 인가할 경우, 인가되는 자장의 비대칭성만 약간 증가시키면 이러한 효과를 줄 수 있다.

6. 결 론

초크랄스키법에 의한 8인치 단결정 성장계에 대칭 커스프 자기장과 비대칭 커스프 자기장을 인가하였을 경우 유동과 산소의 농도 분포에 미치는 영향에 대한 수치 해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저레이놀즈수 난류모델을 사용해 자장을 인가할 경우 액상의 유동에 대한 수치해석적 결과를 얻을 수 있었다.

2) 대칭 커스프 자장을 인가할 경우, 액상의 난류적 특성은 많이 감소하였으며 결정으로 혼입되는 산소의 농도는 감소시키고, 균일한 분포를 갖도록 할 수 있었다.

3) 비대칭 커스프 자장의 인가는 결정으로 혼입되는 산소의 농도를 증가시킬 수 있었다.

4) 대칭과 비대칭 커스프 자장의 적당한 조합을 통해 축방향으로 낮고 균일한 산소 분포를 가진 결정을 얻을 수 있음이 예측되었다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 교육부 신소재 분야 연구지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 정형태, 윤종규, 대한금속학회지 (to be published).
- [2] K. Kakimoto, M. Watanabe, M. Eguchi and T. Hibiya, *J. Cryst. Growth* 126 (1993) 435.
- [3] K. Kakimoto, M. Eguchi, H. Watanabe and T. Hibiya, *J. Cryst. Growth* 94 (1989) 412.
- [4] H. Hirata and N. Inoue, *Jpn. J. Appl. Phys.* 23 (1984) L527.
- [5] 정형태, 초크랄스키법에 의한 실리콘 단결정 성장시 유동 및 물질전달에 관한 수치해석적 연구, 서울대학교 박사학위논문 (1994).
- [6] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere (1980).
- [7] F. Rosenberger and G. Müller, *J. Cryst. Growth* 65 (1983) 91.
- [8] W.P. Jones and B.E. Launder, *Int. J. Heat Mass Transfer* 15 (1972) 301.
- [9] B.E. Launder et al., *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 3 (1974) 269.
- [10] H. Hirata and K. Hoshikawa, *J. Cryst. Growth* 106 (1990) 657.
- [11] V. Bojarevics, J.A. Freibergs, E.I. Shilova and E.V. Shcherbinin, *Electrically Induced Vortical Flows* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1989).
- [12] K.R. Cramer and S.I. Pai, *Magneto-fluid Dynamics for Engineers and Applied Physicists* (McGraw-Hill, New York, 1984).
- [13] A. Murgai, *Crystal Growth of Electronic Materials* eds., E. Kaldis (1985) p. 211.