

## 저융점 금속을 사용한 초크랄스키 실리콘 단결정 성장 공정의 열유동 모사 실험

이상호, 김민철, 이경우

서울대학교 재료공학부, 서울, 151-742

(1999년 2월 2일 접수)

### A cold model experiment on the thermal convection in the czochralski silicon single crystal growth process

Sang-Ho Lee, Min-Cheol Kim and Kyung-Woo Yi

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received February 2, 1999)

**요약** 초크랄스키 결정성장계의 산소농도에 영향을 주는 유동거동에 대한 정보를 얻기 위해 저온모형을 이용하여 실험적으로 초크랄스키 멜트에 내의 유속을 측정하였다. 실리콘 멜트와 유사한 프란틀(Pr) 수를 갖는 저 융점의 Woods metal을 작동유체로 채택하였다. 전기 전도성을 갖는 유체에서 속도 측정이 가능한 일체형 자석 프로우브(Incorporated magnet probe)를 제작하여 멜트 내부의 여러 지점에서 유속을 3차원적으로 측정하였다. 측정 결과 관찰된 속도장은 자연대류가 지배적이며 비축대칭적인 유동양상을 나타내었다. 또한 멜트의 두 지점에서 동시에 측정된 온도 데이터로부터 상관계수 및 도가니 회전에 의한 온도 wave의 전파를 분석한 결과 상관계수의 크기는 기존의 소형 실리콘 멜트의 연구에서 구한 값보다 작게 나타났으며 이러한 현상은 규모가 큰 멜트의 유동은 난류인 거동이 더 강해지기 때문에 발생하는 것으로 파악되었다.

**Abstract** An experimental simulation on the flow in Czochralski melt using a cold model was carried out to obtain the velocities of fluid flow which affects the oxygen concentration of Czochralski crystal growing system. Low melting point Woods metal with similar Pr number to the silicon melt was adopted as a working fluid. Local flow velocities at numerous positions in the melt were simultaneously measured in three dimension using incorporated magnet probe. The measured velocity field showed a non-axisymmetric pattern dominated by natural convection. The analysis on the correlation between data set of temperatures simultaneously measured at two melt positions showed that the values of correlation coefficients were smaller than those of previous study on the small size of silicon melt and these phenomena are believed to occur because turbulent behavior becomes stronger in large size of the melt.

#### 1. 서 론

초크랄스키 단결정 성장법(Czochralski crystal growth method, 이하 CZ법)에 의해 성장된 실리콘웨이퍼 내에는 성장방향 또는 반경방향으로 산소의 미시적인 농도 요동(concentration fluctuation)이 존재한다[1]. 이 요동의 원인은 결정성장 장치의 비대칭적인 온도 분포 내에서 결정이 성장되는 과정 중 응고속도가 변화하기 때문인 것으로 추측되어 왔다. 그러나 결정성장 장치의 대칭성이 향상됨에도 불구하고 단결정 성장 시 멜트의 온도를 측정한 결과 온도가 계속 변동함이 밝혀

졌고[2], 요동에 관계된 주파수를 분석해 본 결과[3] 이러한 변동의 근본 원인은 도가니 내에서 발생하는 멜트의 유동에 관련되어 있을 것으로 추정된다.

CZ 결정성장계에서 석영 도가니로부터 혼입된 산소는 확산(diffusion)이나 대류(convection)에 의해서 멜트로 전달되고 도가니로부터 유입된 열은 전도(conduction)나 대류(convection)로 멜트 내부로 전달된다. 이 중에서 실제 CZ 멜트 내에서 물질전달과 열전달을 지배하는 주된 이동기구(transport mechanism)는 대류이다. 또한 최근에는 실리콘웨이퍼의 대구경화 추세에 의해 도가니 크기가 대형화됨에 따라 멜트 내의 이동현

Table 1  
Thermophysical properties of silicone oil (Toshiba Silicon TSF-451-500) and silicon

| Parameter                                               | Silicon oil            | Silicon              |
|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------|
| Density ( $\text{kg/m}^3$ )                             | 971                    | 2430                 |
| Thermal conductivity ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )    | 0.16                   | 54                   |
| Thermal diffusivity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )          | $1.091 \times 10^{-7}$ | $5 \times 10^{-8}$   |
| Viscosity ( $\text{kg/m} \cdot \text{s}$ )              | $4.885 \times 10^{-1}$ | $7 \times 10^{-4}$   |
| Kinematic Viscosity ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )          | $5 \times 10^{-4}$     | $2.9 \times 10^{-8}$ |
| Specific heat capacity ( $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ) | 1510                   | 1000                 |
| Volume expansion coefficient ( $\text{K}^{-1}$ )        | $0.95 \times 10^{-3}$  | $1 \times 10^{-4}$   |
| Prandtl number                                          | 4583                   | 0.013                |

상은 한층 더 대류에 의해 지배됨에 따라 대류에 의한 물질 및 열전달의 중요성은 더욱 커지고 있다. 따라서 많은 연구자들이 유속 측정을 통하여 대류에 대한 연구를 시도하고 있다.

CZ 멜트 내의 유동을 파악하기 위한 방법은 실험에 의한 측정과 수치해석이 있다. 실험적으로는 우선 유동 관찰이 용이한 투명유체(실리콘 오일, 물)에 트레이서(tracer)를 넣고, 그 궤적을 사진기나 LDV(Laser Doppler Velocimetry) 등의 광학장치로 관찰하여 유속을 유추하는[4, 5] 방법이 많이 사용된다. 그런데 투명유체는 대부분 열전도도, 전기전도도, 밀도 등의 물성값이 Table 1에서 보듯이 실리콘 멜트의 값과 많이 다르므로 투명유체에서 관찰된 유동 양상은 실제 CZ 멜트 내에서의 유동과 차이가 많이 날 것이다. X-ray radiography [6]를 적용하여 실리콘 멜트 내의 트레이서 궤적을 추적하여 실리콘 멜트의 유동을 직접 측정하면 이러한 물성값의 차이에 따른 문제는 없지만, X선 투과력의 한계로 인해 소형의 실리콘 멜트에 대해서만 실험이 가능하다. 또한 실리콘 단결정 성장 시에 이러한 실험을 한다면 고온의 작업온도, 산화를 막기 위한 밀폐 및 조업 조건의 고정에 따른 변수의 제약 등으로 측정에 많은 한계가 있다.

이러한 어려움 때문에 많은 연구자들이 수치해석을 통해서 유속을 계산[3, 7] 하고 있다. 그러나 대형의 도가니에서 실리콘 멜트와 같이 Pr 수가 작은 유체에 대한 측정 결과가 없기 때문에 수치해석 결과를 검증할 수 있는 자료가 없는 점이 문제점이다. Pr 수( $\nu/\alpha$ )는 점성계수와 열전달 계수의 비를 나타내는 값으로, 초크랄스키 시스템과 같이 온도 차이에 의한 유동이 강하게 발생하는 계에서는 이 값에 따른 유동 특성의 변화가 매우 크

기 때문에 이 값이 수십만 배 차이가 나는 실리콘 오일과 실리콘 멜트의 유동 차이는 대단히 클 수밖에 없다.

본 연구에서는 고온의 실리콘 멜트 실험의 난점을 극복하기 위해 실리콘 멜트와 Pr 수가 비슷하면서 융점이 낮은 멜트를 작동유체로 채택하여 규모가 큰 도가니에서의 유속 측정을 함으로써, 멜트 내의 속도 분포를 밝혔다. 유속 측정을 위해서는 국소 유속(local flow velocity)의 측정이 용이한 일체형 자석 프로우브(Incorporated magnet probe)[8, 9]를 제작하여 사용했다. 본 실험 결과는 멜트내의 유속 분포를 밝힘으로써 실리콘 단결정 성장 시 산소의 전달 기구를 규명하는데 도움을 줄 것이고, 프란틀 수가 작은 멜트에 대한 수치해석 결과의 검증 자료로도 큰 의미를 가질 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 일체형 자석 프로우브의 구조 및 유속측정 원리

유속을 측정하기 위해 본 연구에서 제작한 일체형 자석 프로우브의 구조는 Fig. 1에 도시되어 있다. 먼저 유속의 2차원 성분을 결정하기 위해 필요한 프로우브는 Fig. 1(b)와 같이 강자성 계열인 원통형 자석이 일직선 모양의 스테인레스 튜브에 삽입되어 고정되어 있고 자석 주위로는 유속의 2차원 성분에 대응하는 유도전압을 측정하기 위해 4개의 전선들이  $90^\circ$  간격으로 위치해 있다. 그리고 유속의 측방향 성분을 결정하기 위해서 한 종류의 프로우브가 더 필요하며 Fig. 1(a)와 같이 직각

Axial velocity measurement      2-Dimensional measurement

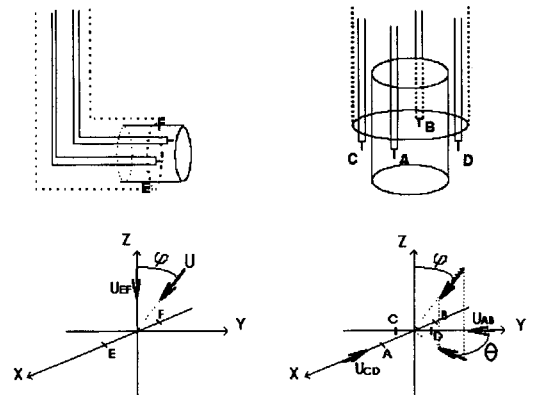


Fig. 1. Schematic of velocity probe and magnitude and direction of velocity in a 3-dimensional flow. Left figures show the sensor for measuring axial component, and right figures show sensor for measuring radial and azimuthal components).

으로 꼬부라진 튜브 내에 자석이 삽입되어 있고 2개의 전선들이 자석 주위에 180° 간격으로 위치해 있다. 프로우브에 의한 유속 측정 원리는 전자기유체역학(magnetohydrodynamics)에 바탕을 두고 있는 바 전극 A-B, C-D, E-F에서 측정된 유도전압  $V_{AB}$ ,  $V_{CD}$ ,  $V_{EF}$ 는 각 전극간 가상의 연결선  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CD}$ ,  $\overline{EF}$ 에 수직한 유속  $U$ 의 성분 크기  $u_{AB}$ ,  $u_{CD}$ ,  $u_{EF}$ 에 비례하므로 아래와 같이 표현되며

$$\begin{aligned} V_{AB} &= k_0 u_{AB} \\ V_{CD} &= k_0 u_{CD} \\ V_{EF} &= k_0 u_{EF} \end{aligned} \quad (1)$$

3차원적으로 국소 유속 크기는 다음과 같다.

$$|U| = \sqrt{u_{AB}^2 + u_{CD}^2 + u_{EF}^2} \quad (2)$$

유속 방향은 Fig. 1에서 유속  $U$ 를 각 성분으로 분해할 때의  $\pi$ ,  $\theta$ 로 나타내며 아래의 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} u_{AB} &= |U| \sin \phi \delta \\ u_{CD} &= |U| \sin \phi \delta \\ u_{EF} &= |U| \cos \phi \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $k_0$ 는 유속과 전압의 관계를 나타내는 상수로 자석의 세기와 크기 그리고 멜트의 물성값에 의존하기 때문에 실험 계에 따라서 달라진다.

## 2.2. 상사성(similarity)의 원리

CZ 결정 성장 계의 원형(prototype)에 대한 직접적인 실험 대신에 축소 모형(model)으로 실험을 할 때 원형과 모형사이의 서로 무차원 수가 동일하면 상사성이 만족된다고 본다. 일반적으로 CZ 멜트를 지배하는 방정식을 원통형 좌표계에서 무차원 형태로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \text{연속방정식;} \\ \nabla \cdot \mathbf{V}^* &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{운동량 방정식;} \\ \frac{\partial \mathbf{V}^*}{\partial t} + (\mathbf{V}^* \cdot \nabla) \mathbf{V}^* &= -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \mathbf{V}^* + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}} \Theta \mathbf{e} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{에너지 방정식;} \\ \frac{\partial \Theta}{\partial t} + (\mathbf{V}^* \cdot \nabla) \Theta &= \frac{1}{\text{RePr}} \nabla^2 \Theta \end{aligned} \quad (6)$$

위의 지배방정식에서 무차원 속도( $\mathbf{V}^*(r, \theta, z)$ )와 무차원 온도( $\Theta(r, \theta, z)$ )는 다음과 같이 정의되며

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^*(r, \theta, z) &= \frac{\mathbf{V}(r, \theta, z)}{\omega r_c} \\ \Theta(r, \theta, z) &= \frac{T(r, \theta, z) - T_c}{T_w - T_c} \end{aligned} \quad (7)$$

$\omega$ ,  $r_c$ ,  $T_w$ ,  $T_c$ ,  $\mathbf{e}$ 는 각각 결정회전속도, 결정반경, 도가니 벽 온도, 결정 온도, 그리고 축방향 단위벡터이다. 나머지의 무차원 수는 아래와 같이 주어지며

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\omega r_c^2}{\nu} \\ \text{Gr} &= \frac{g \beta \Delta T r_c^3}{\nu^2} \\ \text{Pr} &= \frac{\nu}{\alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

Re는 Reynolds Number, Gr은 Grashof Number, Pr은 Prandtl Number이다.

부호  $\nu$ ,  $g$ ,  $\beta$ ,  $r_c$ ,  $\alpha$ ,  $\Delta T$ 는 각각 동점성계수, 중력가속도, 체적열팽창계수, 도가니 반경, 열전도도 그리고 멜트 내의 최대온도차를 나타낸다.

모형의 Reynolds 수는 결정회전속도를 조정하여 원형의 Reynolds 수와 같게 할 수 있고 모형의 Grashof 수는 멜트 반경이나  $\Delta T$ 를 조절함으로써 원형과 같게 맞출 수 있지만, Prandtl 수는 선택된 멜트의 고유한 물성값인 동점성계수와 열전도도에 의해 이미 정해진 값이므로 임의로 조절하여 동일하게 맞출 수 없다.(예로 실리콘 오일은 Prandtl 수가 수천 내지 수만으로 실리콘 멜트의 Prandtl 수(0.013)와 많이 달라서 상사가 잘 이뤄지지 않게 된다.) 본 연구에서는 Prandtl 수가 약 0.02로 실리콘 멜트와 비슷하면서 융점이 낮은 Woods metal을 작동유체로 채택하였으며 이에 대한 물성값은 Table 3에 요약되어있다.

## 3. 실험 방법

### 3.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치의 개략도는 Fig. 2와 Fig. 3에 도시되어있다. Fig. 2는 유속 프로우브를 보정하기 위해 제작된 보정장치(calibration apparatus)로서 환형 모양이며 내벽과 외벽 사이의 간격은 50 mm이며 이 부분에 멜트가 채워진다. Fig. 3은 유속 및 온도를 측정하는데 사용된 전체 시스템에 대한 개략도이다. 실험 장치의 주요 요소들은 회전장치, 가열 및 온도제어 장치 그리고 데이터처리 장비이다. 고하중의 금속멜트를 회전시키기 위해 큰 토크 발생에 적합한 직류모터가 파워

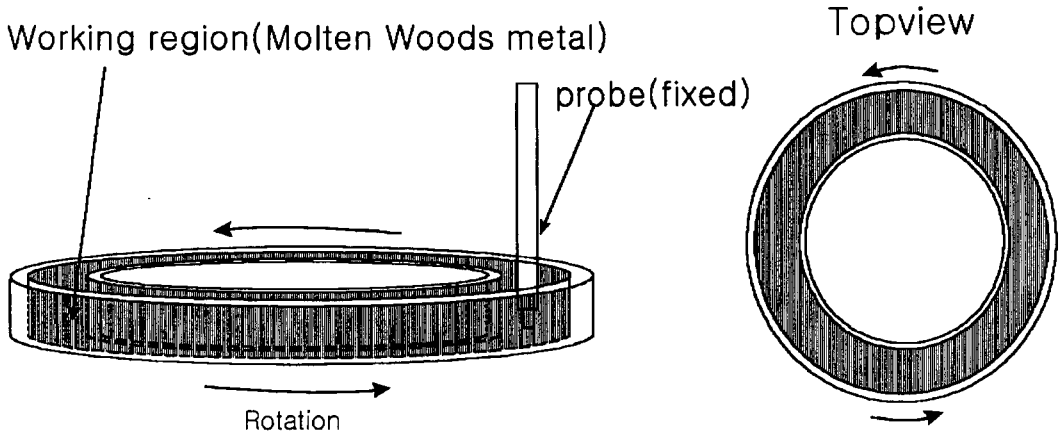


Fig. 2. Schematic diagram of calibration device. Melt is in the hatched region.

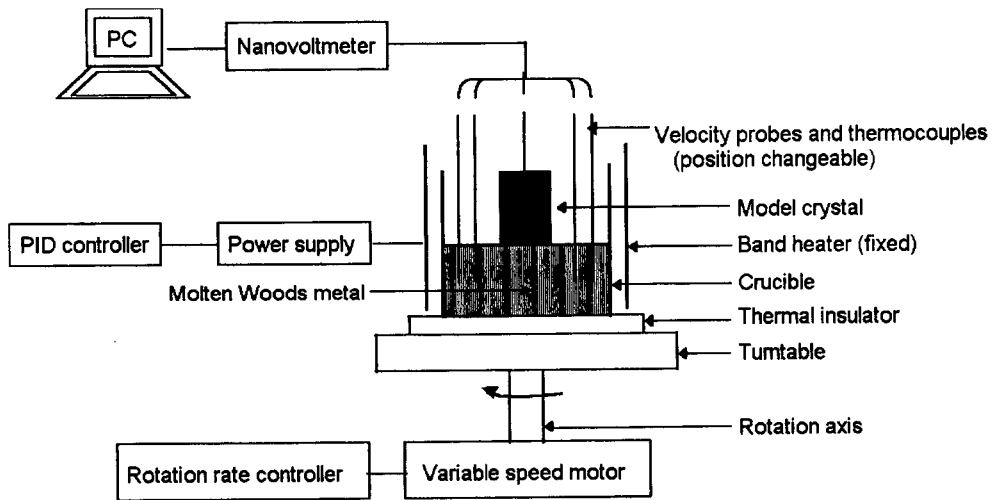


Fig. 3. Schematic of local velocity and temperature measurement system.

드라이버로 사용되었고 슬라이더스가 회전각속도의 정밀한 제어를 위해 장착되었으며 전원으로부터 모터로의 입력되는 전력을 조절함으로써 원하는 회전각속도를 발생시킬 수 있도록 하였다. 또한 비례적분미분(PID) 방식

의 온도제어기가 도가니 벽의 온도를 정밀하게 제어하기 위해 채택되었으며 도가니는 히터로부터 금속멜트로 신속히 열을 전달시키기 위해 열전도도가 비교적 큰

Table 2  
Geometrical and operational conditions for the experiments

| Parameter                         | Experiment |
|-----------------------------------|------------|
| Crucible diameter (mm)            | 200        |
| Crucible height (mm)              | 200        |
| Diameter of model crystal (mm)    | 70         |
| Melt depth (mm)                   | 100        |
| Crucible rotation rate (rpm)      | 1 or 3     |
| Wall temperature of crucible (°C) | 135        |
| Temperature of model crystal (°C) | 118        |

Table 3  
Physical data of woods metal used in the experiments [10]

| Composition (wt %)                              | 50Bi-25Pb-12.5Sn-12.5Cd |
|-------------------------------------------------|-------------------------|
| Melting temperature (°C)                        | 70                      |
| Density (kg/m <sup>3</sup> )                    | $8.37 \times 10^3$      |
| Specific heat (J/kg K)                          | $1.225 \times 10^2$     |
| Electrical conductivity (cm <sup>2</sup> /s)    | $9.0 \times 10^3$       |
| Thermal conductivity (J/m s K)                  | $1.405 \times 10^1$     |
| Volume expansion coefficient (K <sup>-1</sup> ) | $1.0 \times 10^{-4}$    |
| Prandtl number                                  | 0.0197                  |

Al 2024 합금으로 제작되었고 그 크기는 Table 2에 주어져 있다.

측정에 사용된 유속 프로우브는 직경이 5 mm인 영구 자석으로 만들어 졌고 K형 열전대는 직경 1 mm이다. 다수의 유속 프로우브와 열전대가 홀더에 고정된 채로 멜트 내의 여러 위치에서 유속과 온도를 동시에 측정했다. 그리고 프로우브에서 나온 신호들은 multiplexor가 탑재된 nanovoltmeter에 의해 디지털 값으로 판독되며 또한 RS-232 cable을 통해 개인용 컴퓨터로 이송되어 처리했다.

### 3.2. 유속 프로우브의 보정(calibration)

#### 3.2.1. 보정의 필요성과 원리

유도전압과 유속은 직선적인 관계를 갖는다. 그러나 그 비례 상수( $k_0$ )는 앞에서 설명한 바와 같이 실험 계에 따라서 다르기 때문에 본 실험에 앞서 유속 프로우브에 대한 보정이 필요하다.

보정실험은 Fig. 2와 같이 회전판 위에 고정시킨 용융 Woods metal을 담은 보정장치에 유속 프로우브를 중간 지점에 설치하고 일정한 각속도로 회전시켜 가면서 각각의 회전속도에 대해 발생한 유도전압을 측정한다. 이때 보정장치의 내벽과 외벽간 폭은 좁으므로 보정장치의 회전 시 작업구역에 담긴 용융 Woods metal의 미끄러짐(slip)은 거의 무시가능하며 따라서 유속 프로우브를 지나가는 유체의 유속은 회전하는 보정장치의 중심으로부터 유속 프로우브가 고정된 위치에서 주어지는 보정장치의 회전속도에서 계산할 수 있게 된다.

#### 3.2.2. 보정 결과

용융 Woods metal이 담긴 보정장치의 회전각속도를 0 rpm에서부터 6.5 rpm까지 0.5 rpm 간격으로 증가시

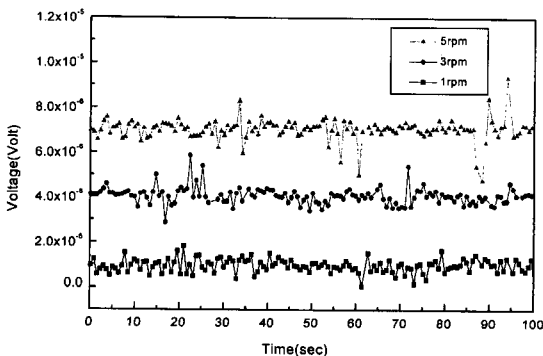


Fig. 4. Voltage outputs in calibration experiments. Square (■) means 1 rpm, circle (●) is 3 rpm and triangle (▲) shows 5 rpm data.

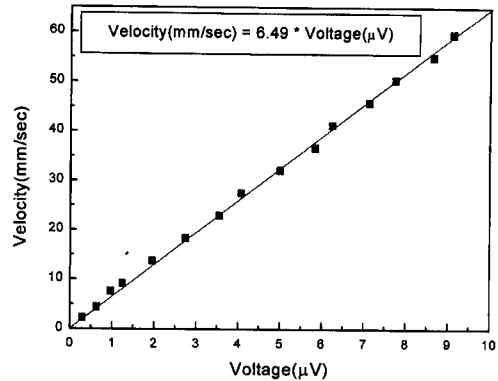


Fig. 5. Calibration results of the probe. Squares show the measured data and line is the linear fitting the experimental data.

키면서 각 rpm에서 100초 동안 측정된 유도전압 신호를 Fig. 4에 나타내었으며 발생 전압은 회전 속도에 비례하여 상승함을 확인할 수 있었다. 측정된 유도전압 신호 중에는 비정상적으로 크거나 작은 소수의 신호들이 간헐적으로 존재함을 볼 수 있는데 이것은 외부로부터 유입된 미소한 noise의 영향 때문인 것으로 판단되며 본 실험에서 이러한 noise의 영향을 제거하기 위해 계측기인 nanovoltmeter로 연결되는 유속 프로우브의 전선을 꼬고(twisted) 계측기 자체도 상당히 noise에 강한 종류를 사용하였으나 실제적으로 noise를 완벽히 차단하는 현실적으로 불가능하였다.

Fig. 5는 여러 회전 속도에서 측정된 전압의 평균값과 유속의 관계이며 최소자승법(least mean square method)에 의해 fitting한 결과도 같이 도시했다. Fitting한 결과 0 mm/sec로부터 65 mm/sec까지의 넓은 유속범위에서도 유도전압과 유속사이에는 직선적 관계가 잘 형성됨이 확인되었고 식(1)의 결과와도 잘 일치함을 보여준다. 보정 실험의 결과 얻어진 직선의 기울기는  $6.49 \text{ mm}/\mu\text{V} \cdot \text{sec}$ 이므로 이의 역수인 프로우브의 보정계수는  $0.154 \mu\text{V} \cdot \text{sec}/\text{mm}$ 로 결정하였다.

### 3.3. 멜트 내 유속 및 온도 측정

#### 3.3.1. 유속

유속을 3차원적으로 측정하기 위해서 먼저 일직선 프로우브를 원하는 지점에 설치하고 유속의 반경방향 성분과 원주방향 성분에 대응하는 유도전압을 측정하였으며, 직각으로 꼬부라진 프로우브를 동일한 지점에 위치시켜 유속의 축방향 성분에 해당되는 유도전압을 측정 한 후 보정 실험에서 결정된 유속 프로우브의 보정계수 값을 적용하면 유속의 반경방향 성분과 원주향 성분 및

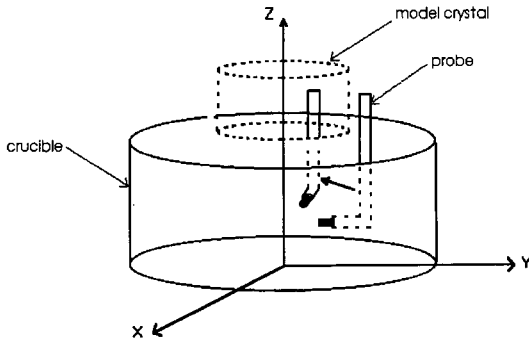


Fig. 6. Location of the probe for velocity measurement below model crystal.

축방향 성분의 크기로 환산된다.

본 연구에서는 다수의 유속 프로우브를 홀더에 고정시킨 후 멜트의 여러 지점에서 유속을 동시에 측정했다. 그러나 반경  $\pm 1$  cm,  $\pm 2$  cm,  $\pm 3$  cm인 곳은 멜트 중심의 모형결정으로 인해 일직선 프로우브를 위치시키기가 불가능하므로 유속의 원주방향 및 축방향 성분에 해당하는 유도전압을 측정하기가 곤란하다. 이에 대한 대책으로 유속의 축방향 성분을 측정하기 위한 프로우브의 자석 주위에도 일직선 프로우브와 유사하게 4개의 전선을 배치시켜 기존의 프로우브를 개량하였다. 그런 다음 Fig. 6에서와 같이 주어진 멜트의 위치에서 개량된 프로우브를 y축에 평행하게 위치시켜 유속의 원주방향과 축방향 성분의 전압을 측정하고 또 한번은 프로우브를 90° 돌려 x축에 평행하게 위치시켜 유속의 반경방향 성분의 전압을 측정하였다.

### 3.3.2. 온도

유속측정에서와 유사한 방식으로 다수의 K형 열전대를 홀더에 고정시키고 하나의 자오면에서 온도를 동시에 측정하였다. 또한, 멜트의 두 지점에서 온도를 동시에 측정 한 두 개의 시계열 데이터의 상관계수를 구하여 도가니 회전속도 변화에 의한 유동과 온도 변동을 분석하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 속도장 및 온도장 분석

모델 결정과 도가니 벽 사이의 온도차가 17°C이고, 도가니 벽을 따른 원주 방향의 온도 분포는 정지상태에서 최대 차이가 0.5°C 이하가 되도록 하였다. 도가니 회전 각 속도가 1 rpm일 때 직경 20 cm, 높이 10 cm인 멜트에 대

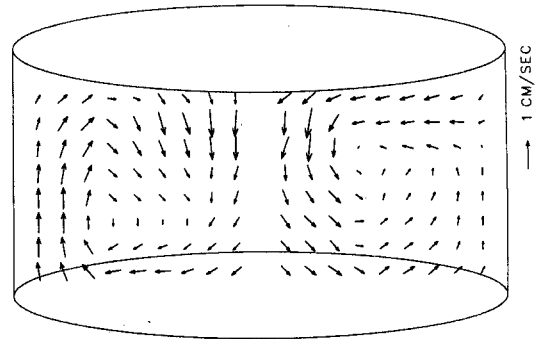


Fig. 7. Experimentally determined velocity profile in the melt at the crucible rotation of 1 rpm.

하여 측정된 속도장을 Fig. 7에 도시하였다. 측정된 위치는 멜트 중심으로부터 반경을 따라 좌측과 우측방향으로 각각 1 cm부터 9 cm까지 1 cm 간격이며 축방향으로는 도가니 바닥으로부터 멜트 표면 쪽으로 1 cm부터 8 cm까지 1 cm간격으로서 총 144개의 각 위치에서 10분 동안 측정된 유속의 평균치를 벡터로 나타내었다.

Fig. 8은 Fig. 7과 동일한 도가니 회전속도, 온도차일 때 측정된 온도분포를 보여준다. 축방향으로는 도가니 바닥으로부터 멜트 표면 쪽으로 1 cm부터 9 cm까지, 반경방향으로는  $\pm 4$  cm부터  $\pm 9$  cm까지 1 cm 간격으로 측정된 온도분포이며 결정 아랫부분의 온도는 열전대를 정확히 위치시키기가 어려워 측정에서 제외되었다.

먼저 Fig. 8의 온도분포와 비교하여 유동의 흐름을 살펴보면, 일반적으로 유동은 온도가 높은 양쪽 도가니 벽 쪽에서부터 멜트 표면으로 상승하여 온도가 낮은 모델 결정 쪽으로 이동하고 멜트 중심부근에서부터 다시 도가니 밑바닥 쪽으로 하강하고 있음을 볼 수 있다. 이것은 자연대류에 의한 영향으로서 도가니 벽 부근의 유체의 온도는 다른 곳보다 높고 밀도가 낮으므로 부력에 의한 상승 유동이 발생하고, 반대로 결정 부근의 온도는 낮아 유체의 밀도가 높아져 하강하는 유동이 발생함으로써 속도장은 멜트 중심을 경계 축으로 좌·우측으로부터 유체가 결정부근으로 몰려드는 순환구조를 형성하고 있다. 이러한 속도장은 Pr 수가 작은 멜트가 담겨있는 직경 20 cm 도가니에서는 최초로 얻어진 것으로, 수치해석 등의 검증 자료로 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

그리고 전체적으로 볼 때 속도장은 비축대칭임을 알 수 있는데 이러한 비축대칭 구조의 원인으로서는 크게 실험 장치의 비축대칭성과 멜트 내 유동의 불안정성(flow instability)[3] 두 가지를 생각할 수 있다.

본 실험 장치에서 측정 한 도가니 벽을 따른 온도 분포는 앞에서도 설명한 바와 같이 0.5°C 이하이기 때문에 멜트 중심과 도가니 벽 사이의 온도차이 17°C와 비교한



Table 4  
Comparison of the previous experiment and the present work

|                        | Previous experiment | Present work       |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| Radius of crucible     | 3.5 cm              | 10 cm              |
| Temperature difference | 20°C                | 17°C               |
| Rotation rate          | 1 rpm               | 1 rpm              |
| Pr number              | 0.013               | 0.020              |
| Re number              | 195                 | 1,850              |
| Ra number              | $9.31 \times 10^6$  | $2.29 \times 10^8$ |

한 주기는 도가니의 1회전 주기인 60초에 비해서 상당히 빠른 것이다. 이러한 주기의 온도 변동이 발생하는 원인에 대해서 명확히 밝힐 수는 없지만, 이 주기는 도가니의 회전 주기와는 비례관계에 있지 않기 때문에 온도 변동이 도가니 회전의 쓸림이나 장치의 비축대칭 온도 분포에 의한 것이 아니라는 것을 보여주고 있다.

그런데 본 실험에서 얻어진 상관 계수는 Kakimoto 등의 연구결과[3]와 비교하면 크기가 작다. 이 이유는 Kakimoto 등의 연구에 사용된 멜트는 직경 수십 mm 내외의 소형인데 반해 본 실험에 사용된 멜트는 직경 200 mm로서 규모가 크기 때문이다. 이에 따라서 Table 4에서 보는 바와 같이 Re 수(회전에 의한 대류 발생의 정도를 보여주는 값)나 Gr 수(자연 대류의 크기를 보여주는 값)가 상대적으로 커진다. 따라서 난류가 강해지면서 난류 유동의 고유 특성인 불규칙성(irregularity of turbulent flow)으로 인해 도가니 회전 시 온도 요동의 wave가 멜트의 동일한 반경의 경로를 따라 지속적으로 전파되지 못하고 위치에 따라 온도 wave의 파장 및 요동성분의 크기가 변화하게 될 확률이 증가하기 때문에 상관계수값이 감소하는 것으로 해석할 수 있다. 실제 실리콘 단결정을 성장시키는 도가니는 반경이 25 cm 정도 되며 Gr 수를 계산하면  $8.5 \times 10^9$  정도가 되기 때문에 난류 성향은 더욱 강해질 것으로 예상된다. 그러나 도가니 크기에 따른 멜트 유동 특성의 변화는 다양한 크기의 도가니에 대한 정밀한 실험적 측정이 더 진행되어야만 명확히 밝혀질 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

1) 투명유체 및 소형 실리콘 멜트에 대한 기존 연구의 한계를 극복하기 위하여 실리콘과 유사한 물성값을 가진 저 융점의 Woods metal을 작동유체로 채택하였고 규모가 큰 멜트를 도입하여 초크랄스키 멜트에 대한 유동 모사를 구현하였다.

2) 회전하는 멜트 내의 속도장을 결정하기 위한 목적

으로 일체형 자석 프로우브를 제작하였고 멜트의 여러 지점에 대해서 국소 유속을 3차원적으로 측정하였다.

3) 관찰된 속도장은 자연대류가 지배적이었으며 비축대칭의 유동양상을 나타내었다. 이는 도가니의 회전과 자연 대류의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 추정된다.

4) 멜트의 두 지점에서 동시에 측정된 온도 데이터로부터 상관관계 및 도가니 회전에 의한 온도 wave의 전파를 분석한 결과 상관 계수의 최대치는 도가니 회전속도가 느릴 경우는 감소하고 도가니 회전속도가 빨라지면 증가하였다. 기존의 소형 실리콘 멜트에 대한 연구와 비교하면 상관계수 크기가 작았으며 이러한 현상은 규모가 큰 멜트의 유동은 난류 거동이 더 강해지기 때문에 발생하는 것으로 파악되었다.

5) 현재 실리콘 단결정을 성장시키는 도가니에서는 Ra 수( $8.5 \times 10^9$ )가 본 실험 모델( $2.3 \times 10^8$ ) 보다 더 크기 때문에 더욱 강한 난류가 발생할 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 1997년도 교육부 학술 연구 조성비(신소재 분야)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. Müller, Crystal Growth from the melt, Springer-Verlag, Berlin (1988) 8.
- [2] J.A. Burton, R.C. Prim and W.P. Slichter, J. Chem. Phys. 21 (1953) 1987.
- [3] K.-W. Yi, V.B. Booker, M. Eguchi, T. Shyo and K. Kakimoto, J. Crystal Growth 156 (1995) 383.
- [4] A.D.W. Jones, J. Crystal Growth 61 (1983) 240.
- [5] H. Ozoe, K. Toh and T. Inoue, J. Crystal Growth 110 (1991) 472.
- [6] K. Kakimoto, M. Eguchi, H. Watanabe and T. Hibiya, J. Crystal Growth 88 (1988) 365.
- [7] K.M. Kim and W.E. Langlois, J. Electrochem. Soc. 133 (1987) 2586.
- [8] R. Ricou and C. Vivès, Int. J. Heat Mass Transfer. 25 (1982) 1579.
- [9] H.-C. Lee, J.W. Evans and C. Vivès, Met. Trans. 15B (1984) 734.
- [10] J. Partinen, N. Saluja, J. Szekley and J. Kirtley, ISIJ international. Vol. 34 (1994) 708.
- [11] K. Kakimoto, M. Eguchi, H. Watanabe and T. Hibiya, J. Crystal Growth 126 (1993) 435.
- [12] David M. Himmelblau, Process Analysis by Statistical Methods (John Wiley & Sons, New York, 1970) p. 40.