

## Measurement of the temperature and velocity fluctuations occurred by the baroclinic instability in the melt for Czochralski crystal growth method

Seung-Suk Son and Kyung-Woo Yi

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

(Received October 24, 2000)

**Abstract** The temperature and velocity fluctuations occurred by the baroclinic instability in the melt for Czochralski crystal growth method were experimentally investigated. Wood's metal, which has similar Pr number to the silicon melt, was used as the working fluid and azimuthal velocity was measured using incorporated magnet probe. The azimuthal velocities near the free surface are faster than velocities near the bottom and the rotational velocities near the model crystal become very fast. The results of measured temperature fluctuation as increasing rotation rate were shown that baroclinic instability occurred at the region of  $Ro < 1.01$ ,  $Ta > 9.63 \times 10^8$ . In these region, the fluctuations of temperature and velocity have the same frequency.

## 초크랄스키 단결정 성장 멜트에서 baroclinic 불안정성에 의해 발생하는 유동과 온도 변동의 측정

손승석, 이경우

서울대학교 공과대학 재료공학부, 서울, 151-742

(2000년 10월 24일 접수)

**요약** Czochralski 결정 성장 시스템에서 baroclinic 불안정성에 의해 발생하는 유동과 온도 변동에 대해 실험적으로 고찰하였다. 실리콘과 유사한 프란틀 수를 갖는 Wood's metal을 작동유체로 사용하고, 일체형 자석 프로브를 제작하여 멜트의 회전 유속을 측정하였다. 측정 결과 회전 유속은 멜트 바닥에 비해 자유 표면에서 빠르고 특히 결정 근처에서 유속이 증가하는 것을 확인하였다. 또한 도가니 회전 속도를 증가시키면서 속도와 온도 변동을 관찰한 결과  $Ro < 1.01$ ,  $Ta > 9.63 \times 10^8$ 인 영역에서 baroclinic 불안정성이 나타나고, 이 영역에서 유동과 온도가 동일한 주파수를 가지고 변동하였다.

### 1. 서론

초크랄스키 단결정 성장시스템(Czochralski crystal growth method, 이하 Cz)에서 멜트의 유동과 온도의 변동은 산소와 결함(defect), 첨가 물질 분포의 불균일성에 큰 영향을 미친다. 따라서 실리콘 단결정의 특성을 개선하기 위해서는 멜트의 유동과 온도 변동을 이해하고, 이를 제어하는 것은 매우 중요한 사항이다.

실제 Cz 결정 성장 시스템은 멜트 표면과 도가니 바닥, 도가니 벽과 결정의 온도 차이가 발생하고, 도가니와 결정이 반대방향으로 회전하고 있기 때문에 유동에 여러 가지 불안정성이 나타날 수 있다. Ristorcelli 등은 Cz 시스템에서 발생할 수 있는 10가지 이상의 유동의 불안정성을 제안하였다[1].

Cz 시스템에서 유동의 구조적 해석을 위한 연구는 많은 연구자들에 의해 시도되어졌다[2-6]. Watanabe 등은 실리콘 멜트에 텅스텐 코어로 만들어진 트레이서를 넣고 X-ray radiography를 사용하여 유동을 관찰하는 방법을 통해서, 도가니 내의 유동이 도가니의 회전이나 온도 경계 조건에 따라서 대칭 유동에서 비대칭 유동으로 천이하는 것을 관찰하였다[2]. 그러나 이 실험은 X선 투과력의 한계로 인해 소형의 실리콘 멜트에 대해서만 실험이 가능하며 움직이는 트레이서를 통해서 유속을 측정할 수 있기 때문에 특정한 위치의 유속을 측정할 수 없다는 한계를 가지고 있다.

Nakamura 등은 carbon 모델 결정을 가진 실리콘 멜트의 표면 온도 분포를 CCD 카메라로 관찰하여 유동의 구조를 분석하였다[3]. Kishida, Seidl, Lee 등은 멜트의 온도를 써모커플로 직접 측정하여 온도 변동을 관찰하였다[4-

6]. Kishida 등은 결정봉이 없는 400 mm 실리콘 벨트에서 baroclinic 열 과정을 관찰하였다[4]. 이 연구자들은 이러한 온도 변동 결과를 바탕으로 벨트 내부에 유동의 불안정성이 발생하고 있음을 추론하였다. 그러나 온도 변동을 통한 해석은 실제 유동과 온도의 직접적인 연관성을 밝혀내는 것에는 한계를 가지고 있다.

온도와 유동의 거동을 결합시켜서 해석하는 연구는 주로 수치해석을 통해서 이루어졌다. Yi 등은 도가니의 회전 속도가 낮을 때 Rayleigh-Benard 불안정성이 나타나고, 도가니 회전 속도가 높을 때 baroclinic 불안정성이 나타난다고 보고하였다[8]. Baroclinic 불안정성은 실험을 통한 연구자들도 제시했지만 부력과 편향력 사이의 상호작용의 영향으로 발생하는 것으로 초크랄스키 단결정 성장용 도가니 내의 온도 분포와 도가니 및 결정의 회전에 의해서 발생할 수 있다[4, 8]. 이러한 수치해석을 통한 연구는 벨트 유동의 내부 구조와 온도 및 유동의 관계를 밝힐 수 있는 좋은 방법이지만 Pr 수가 작은 벨트에 대해서는 실험적 검증이 충분하지 않고, 현재까지는 직경 7 cm 정도의 작은 도가니에서 트레이서를 통한 유속 측정과 비교한 것이 전부이다.

이러한 실험적 검증의 문제를 해결하기 위해서 최근에 우리는 실리콘 벨트와 Pr 수가 비슷한 저융점 금속 벨트(wood's metal)를 이용한 Cz 시스템 모델에서 속도와 온도를 실험적으로 측정함으로써 시스템이 비축대칭적인(non-axisymmetric) 유동장을 가지고 있음을 보고하였다[7].

이번 연구는 도가니 벽과 결정의 온도 차이가 지배적인 온도 상태에서 시간에 따른 벨트내의 속도와 온도를 직접 측정하여 유동의 불안정성에 따라 온도와 속도의 변동이 어떻게 나타나는지 실험적으로 밝히는 것을 목적으로 한다. 특히 도가니 회전에 따른 회전 유동을 살펴보고, 회전 조건에 따른 속도의 변동과 온도 변동을 측정하였다. 벨트내의 유속 측정을 위해서 사용된 일체형 자석 프로브는 전도성을 가진 유체가 자기장을 지나면서 유속에 비례하는 유도 전압을 발생시키는 원리를 이용하여 부분적인 속도 값을 비교적 정확히 측정할 수 있고 제작이 용이한 장점을 가지고 있다[9, 10]. 이번 연구의 결과는 상대적으로 큰 도가니에서 도가니의 회전에 따른 벨트내의 유속 분포를 직접 측정함으로써, baroclinic 불안정 상태의 발생 조건을 확인하고, 이러한 변화가 있을 때 도가니 내 유동과 유동의 변동이 어떻게 변화하는지 밝혀냈다는 점에서 의미를 가질 것이다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 실험 장치는 참고 문헌[7]에 보다 자

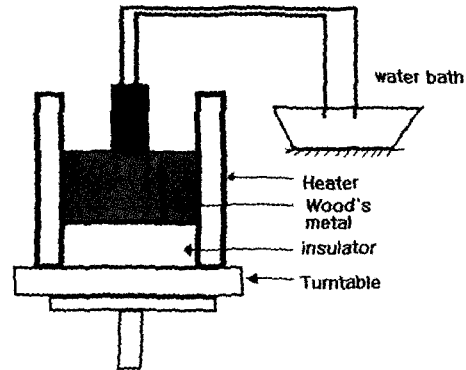


Fig. 1. Schematic diagram of local velocity and temperature measurement system.

Table 1  
Geometrical and operational conditions for the experiments

Parameter	Experiment
Crucible diameter (mm)	200
Crucible height (mm)	200
Diameter of model crystal (mm)	56
Melt depth (mm)	100
Crucible rotation rate, $\Omega_c$ (rpm)	1~5
Wall temperature of crucible ( $^{\circ}\text{C}$ )	96
Temperature of model crystal ( $^{\circ}\text{C}$ )	60

세히 나타나 있다. 실험장치의 개략적인 모양은 Fig. 1에 나타나 있다. 이번 실험에서는 도가니 바닥을 내화 벽돌로 단열시켜 도가니 바닥과 벨트 표면의 온도차이를 줄이고, 모델 결정의 온도를 일정하게 유지하기 위해서 항온 수조를 이용하였다. 항온 수조는 설정온도에서  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차 이내로 유지된다. 도가니는 스테인레스로 제작되어 있으며 그 크기와 실험조건은 Table 1에 주어져 있다. Fig. 2는 유

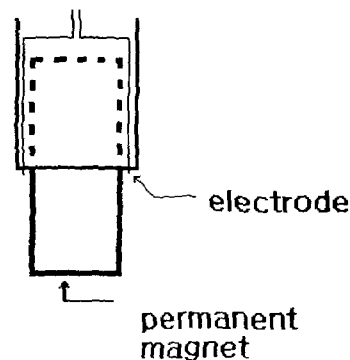


Fig. 2. Schematic diagram of the incorporated magnet probe for local velocity measurements.

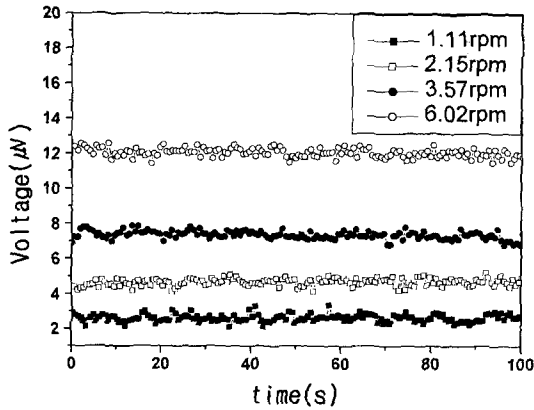


Fig. 3. Voltage outputs in calibration experiments. Rotator rates are 1.11 rpm (■), 2.15 rpm (□), 3.57 rpm (●), 6.02 rpm (○) respectively.

속 측정을 위해 제작한 일체형 자석 프로브를 나타내고 있으며, 중심에서 자장이 0.107T인 직경 5 mm Alnico 영구자석을 사용하였다.

속도 측정에 앞서 각 프로브는 유도전압과 속도와의 관계를 구하기 위해 자석의 자력 세기와 크기 그리고 벨트의 물성값에 의존하는 보정계수를 구해야 한다. 보정실험은 용융 Wood's metal이 담긴 보정장치의 회전 속도를 0 rpm에서 8 rpm까지 0.5 rpm 간격으로 증가시키면서 유도전압을 측정하였다. 보정실험 결과 Fig. 3에 나타난 것처럼 각 회전 속도에 대해 유도전압이 일정한 값을 가지고 있고, 회전 속도가 증가할수록 유도전압도 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 4는 각 회전속도에서 측정된 전압의 평균값과 유속의 관계를 나타내며 최소자승법에 의해 fitting한 결과도 같이 도시하였다. 보정 실험결과 유도전압과 회전 속도는 직선의 기울기를 나타내고 있지만 직선이 정확히 원점을

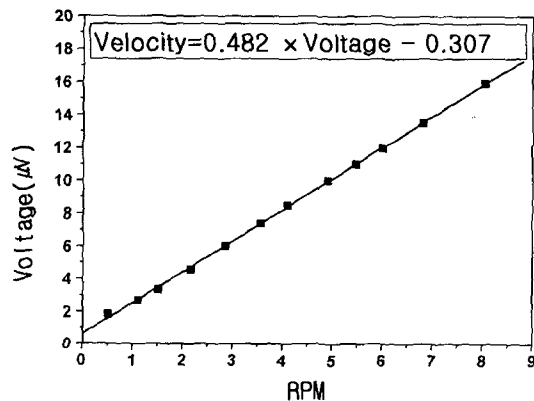


Fig. 4. Calibration results of the probe. Line is the linear fitting the experimental data.

Table 2

Physical properties of Wood's metal

Composition (wt %)	50Bi-25Pb-12.5Sn-12.5Cd
Melting temperature (°C)	70
Density (kg/m <sup>3</sup> )	8.37×10 <sup>3</sup>
Specific heat (J/kg K)	1.225×10 <sup>2</sup>
Electrical conductivity (Ω <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> )	9.0×10 <sup>5</sup>
Thermal conductivity (J m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.405×10 <sup>1</sup>
Volume expansion coefficient (K <sup>-1</sup> )	1.0×10 <sup>-4</sup>
Prandtl Number	0.0197

지나지 않는다. 이는 회전 속도가 0 rpm일 때 유도전압을 측정하면 정확히 0V가 나오지 않고 1 µV 이하의 미세한 전압이 측정된다. 이러한 미세한 전압은 유동에 의해 발생하는 것이 아니라 측정 기기나 유속프로브 자체가 가지고 있는 offset으로 유속프로브의 측정 방향을 바꾸어 가며 유도전압을 측정했을 경우에도 같은 값이 나타났다. 따라서 측정된 전압을 속도로 환산할 때 이 값을 고려해서 계산해 주어야 한다. 직선의 기울기는 0.482 cm/µVsec이며 보정 계수는 이의 역수인 2.075 µVsec/cm로 결정하였다. 작동 유체로 사용된 Wood's metal의 특성은 Table 2에 주어 져 있다.

유속 측정을 위해 프로브를 3차원 이송장치에 설치하고 유속의 원주방향 성분과 대응하는 유도전압을 측정하였다. 프로브에서 나온 신호들은 multiplexor가 탑재된 nanovoltmeter에 의해 디지털 값으로 측정된다.

온도 측정은 직경이 1.6 mm인 K형 열전대가 사용되었다. 온도 신호는 0.1 s 마다 받아들여 기록하고, 도가니 회전 속도를 1~5 rpm으로 증가시키면서 측정하였다. 측정된 속도와 온도 데이터 변동의 주파수 특성을 구하기 위해서 Fast Fourier Transformation(FFT)을 통해 해석하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1. 일체형 자석 프로브를 이용한 회전 속도 측정

도가니 회전 속도가 1~5 rpm으로 변화할 때 일체형 자석 프로브로 회전 속도를 측정된 결과를 Fig. 5에 도시했다. 벨트의 회전 속도는 Fig. 5에서 실선으로 나타낸 도가니 회전 속도 보다 작은 것을 알 수 있다. 또한 도가니 바닥 쪽으로 갈수록 회전 속도가 느려진다. 도가니 바닥과 표면의 속도 차이는 도가니 회전이 빨라질수록 커진다. 이런 현상은 자유표면에서 유동은 벽에 의한 저항이 없어서 회전 속도가 그대로 유지되기 때문에 나타난다. 특히 표면

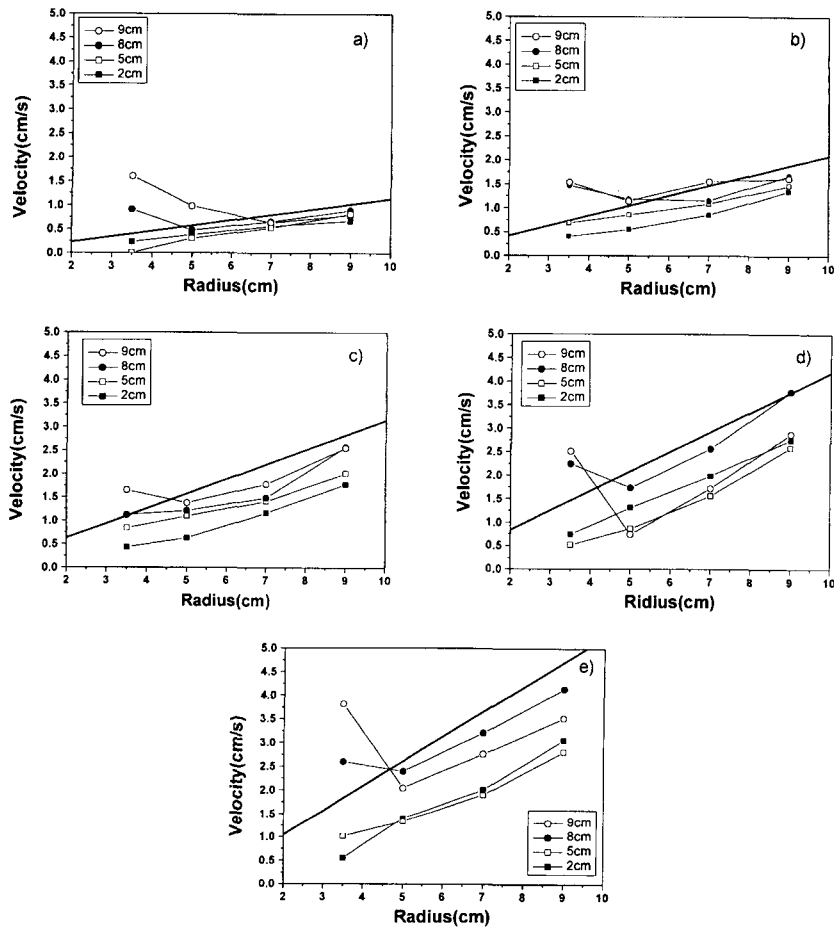


Fig. 5. Azimuthal velocity at constant crucible rotation rate. a) 1 rpm, b) 2 rpm, c) 3 rpm, d) 4 rpm, e) 5 rpm, 2 cm (■), 5 cm (□), 8 cm (●), 9 cm (○) from bottom, respectively.

에서 회전 유속을 살펴보면 결정 부근에서 회전 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 결정 근처에서 회전 유속은 도가니 벽에서 결정으로 들어오는 자연대류에 의해 벽 부근의 회전 운동량이 그대로 전달되면서 중심 근처의 기존 운동량과 합쳐져서 큰 회전 속도를 가지게 되는 것으로 생각되어진다.

이러한 바닥과 표면의 회전 속도 차이는 수치 해석적인 방법으로 유속을 계산한 결과와 일치한다[8, 12]. Yoo 등은 3차원 transient time-dimensional 수치 계산을 통해 멜트 표면과 바닥의 회전 속도 차이가 나타남을 확인하였고, 표면 근처에서 유동장과 온도장이 타원형으로 나타남을 제시하였다[12]. Yi 등도 도가니와 결정을 같은 방향으로 회전하는 조건에 대해 수치해석을 통해 결정 근처에서의 유속이 더 커지는 결과를 제시하였다[8]. 본 연구에서 측정된 결과는 이러한 수치해석의 예측을 검증한 결과라고 할 수 있다.

### 3.2. 온도 변동 측정

Fig. 6은 열전대를 이용해 온도의 시간에 따른 변동과 FFT 분석 결과를 나타낸다. 온도 변동은 도가니 회전 속도가 2, 4 rpm일 때, 멜트의 표면 근처인  $(r, z) = (70, 90)$  위치에서 측정된 값이며, Fig. 6 (b), (d)에서 실선은 도가니 회전에 해당하는 주파수를 나타내고 있다. 온도 변동을 살펴보면 도가니 회전에 따라 표면 근처에서 열파동은 주기성을 가지고 진행되는 것을 확인할 수 있다. FFT분석

Table 3  
Phase velocity and wave number at  $(r, z) = (70, 90)$

Crucible rotation rate	2 rpm	4 rpm
$\omega$ (rad/s)	0.177	0.358
$2\pi f$ (rad/s)	0.184	0.705
$m = 2\pi f/\omega$	1.04	1.97

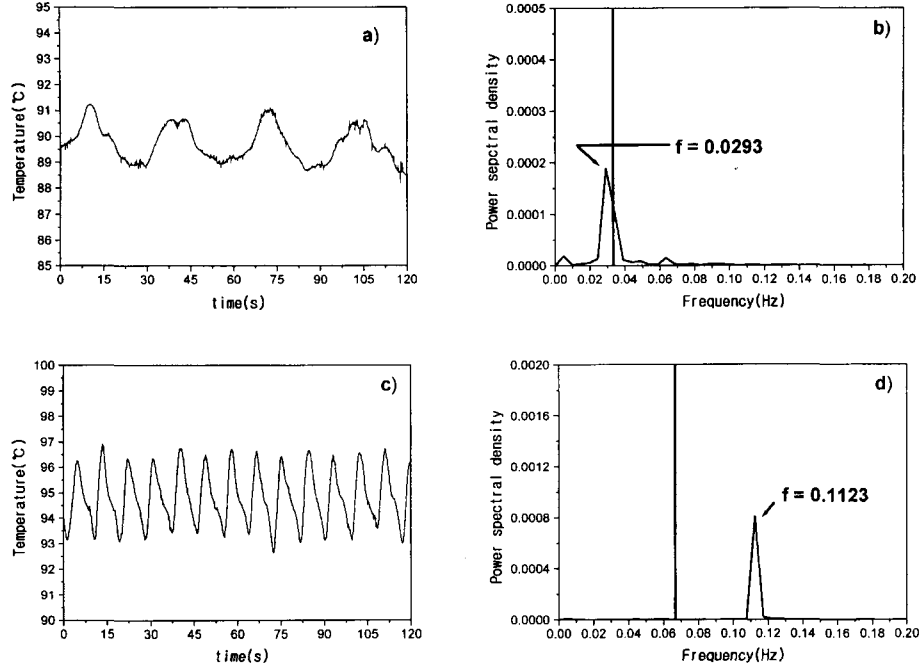


Fig. 6. Temperature profile and FFT spectra of temperature data at  $(r, z) = (70, 90)$ . a), b)  $\Omega c = 2$  rpm c), d)  $\Omega c = 4$  rpm

결과를 살펴보면 도가니 회전 속도가 2 rpm일 때 온도 변동의 주파수가 도가니 회전 주파수(0.033 Hz) 보다 작은 것을 알 수 있다. 하지만 회전 속도가 4 rpm으로 증가하면 온도 변동의 주파수가 도가니 회전 주파수(0.066 Hz) 보다 큰 값(0.1123 Hz)을 가진다. 온도 변동의 주파수( $f$ )와 측정된 멜트의 회전 방향 속도( $\omega$ )를 이용해서 열파동의 파수를 식 (1)로부터 구할 수 있다.

$$m = 2\pi f / \omega \tag{1}$$

실험을 통해 측정된 결과는 Table 3에 나타나있다. 도가니의 회전 속도가 2 rpm에서 4 rpm으로 증가하면 파수도  $m = 1$ 에서  $m = 2$ 로 증가하게 됨을 알 수 있다. 이러한 열파동의 변화는 도가니 회전 속도가 증가함에 따라 baroclinic 불안정성이 나타나기 때문에 발생하는 것으로 생각된다.

도가니 회전 속도를 증가시키면서 측정한 온도 변동의 주파수를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 보는 것처럼 도가니 회전 속도가 2, 3 rpm으로 낮을 때는 온도 변동 주파수가 도가니 회전 주파수보다 작고,  $m = 1$ 인 열파장이 나타난다. 이 열파장의 원인은 실험 시스템의 열적 중심이 정확히 회전 중심과 일치하지 않아서 발생하는 것으로 생각되며 장치 제작상의 문제이다. 도가니회전이 4, 5 rpm으로 증가하게 되면 온도 변동 주파수가 도가니 회전보다 큰 값을 가지며,  $m = 2$ 로 변화한다. 이러한 온도 변동의 변화는 수치해석을 통해서 예측되었던[8, 12] 대로 도가니 회전에 의한 온도장이 타원형으로 변화하기 때문에 나타나게 되는 것으로 그 원인이 baroclinic 불안정성으로 알려져 있다.

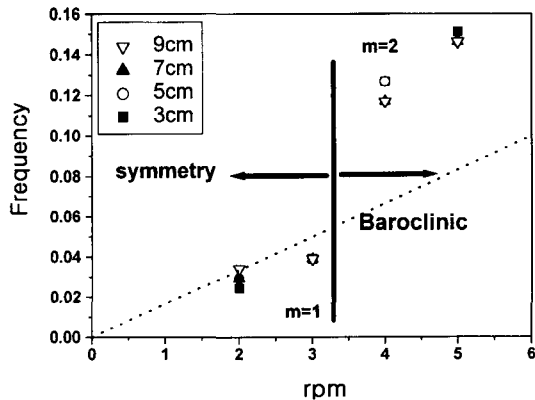


Fig. 7. Frequency with rotation rate at near the melt surface  $z = 90$  mm. 3 cm (■), 5 cm (○), 7 cm (▲), 9 cm (▽) from center, respectively. (Dot line) Frequency of the crucible rotation.

### 3.3. Baroclinic 불안정성의 발생

앞 절에서 나타나는 타원형의 온도 패턴이 생겨나는 원

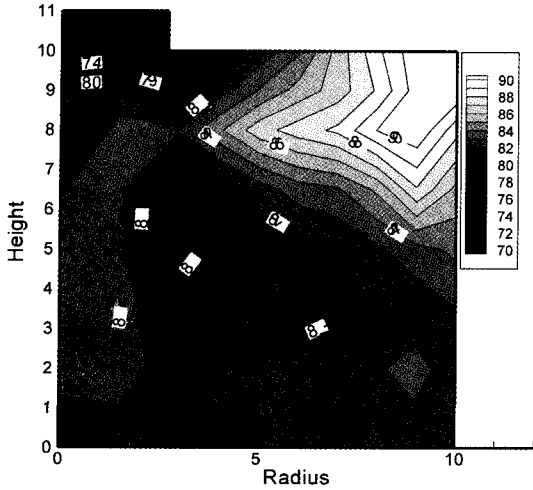


Fig. 8. Temperature distribution in the meridional plane at  $\Omega_c = 3$  rpm.

인이 baroclinic 불안정성 때문인가 확인하기 위해서 멜트 내 자오면(meridional plane) 상의 온도 분포를 측정하였다. Fig. 8은 도가니를 3 rpm으로 회전시키면서 멜트 내의 온도 분포를 측정하여 시간에 대한 평균값을 나타낸 것으로 온도 분포가 수평면에 대해 기울어져 있는 것을 알 수 있다. Ristorcelli[1]등의 고찰에 의하면 멜트내의 자오면이 Fig. 8과 같은 양식으로 기울어진 온도 분포를 가질 때 도가니 회전에 따른 관성력과 편향력의 상호 작용으로 baroclinic 불안정성이 나타난다.

Baroclinic 불안정성이 나타날 때 온도와 유동의 대략적인 모양을 Fig. 9 (a), (b)에 도시하였다. Fig. 9(a)에서처럼 기울어진 온도 경사면(D)에 위치하고 있는 유체를 생각해 보자. D위치에 있는 멜트는 온도가 상대적으로 낮은 E 방향으로 상승하거나, 상대적으로 온도가 높은 G 방향으로 내려가면 내부에너지를 낮출 수 있다. 하지만 F, H 방향의

온도 분포는 안정한 상태이기 때문에 D위치에서 F, H방향으로는 가속력을 받지 않는다. 또한 E 방향으로 이동하려는 유체는 도가니 회전에 의해 발생하는 회전력과 평형을 이루어 온도 경사면을 유지하게 되고, G 방향으로 이동하려는 유체는 부력에 의한 상승력에 의해 온도 경사면을 따라 이동하게 된다. 하지만 도가니 회전이 더욱 빨라져서 회전력이 더욱 커지게 되면 부력의 힘에 비해 회전력이 커져서 G방향으로 내려가는 멜트가 생기고, 아래로 내려간 유체는 회전력의 상대적인 차이와 편향력의 영향으로 vortex를 형성한다. Kakimoto [11]등은 double X-ray를 사용하여 멜트 내에서 이동하는 트레이서를 도가니의 회전과 같은 속도로 회전하는 좌표계에서 관찰하면 baroclinic 불안정성에 의해 vortex가 형성되는 것을 보고하였다.

결과적으로 표면에서 유동을 살펴보면 vortex가 나타나는 부분은 Fig. 9(b)에서처럼 회전 속도가 상대적으로 느려지는 부분이 나타나게 되어 타원형의 유동구조를 가진다. 이러한 유동 구조의 변화는 다음 절에서 고찰하는 속도 변동에 의해서 발생하는 것으로 생각된다.

3.4. 속도 변동 고찰

Fig. 10은 도가니 회전 속도가 5 rpm일 때 전자기 센서를 이용하여 바닥으로부터의 높이가 5 cm, 9 cm이고, 결정 중심으로부터 3.5 cm, 7 cm 떨어진 위치에서 측정한 유도 전압을 나타내고 있다. 시간에 따라 나타낸 유도 전압은 측정 위치에 따라 그 변동 모양이 달라진다. 유도 전압의 변동을 통해 회전 방향 속도가 시간에 따라 일정한 변동을 하고 있음을 알 수 있다. 도가니 바닥에서 5cm 높이에서의 속도 변동인 Fig. 10의 c), d)는 회전의 영향에 따른 진폭의 변화나 주기적인 변화가 크게 나타나지 않는다. 이에 비해 Fig. 10의 a), b)와 같이 멜트 표면으로 갈수록 회전에 따른 변동의 주기성이 나타난다. 이런 특징

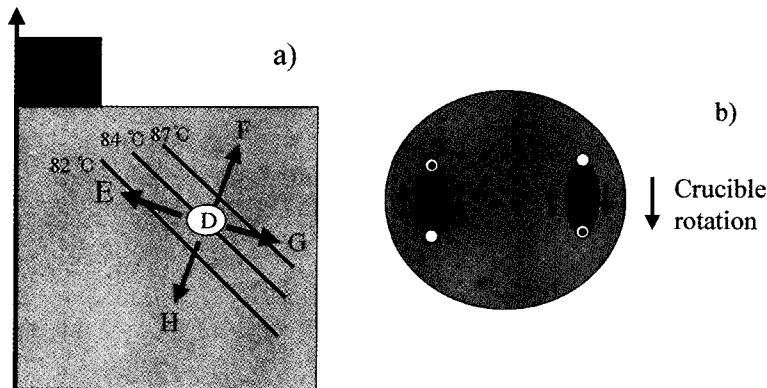


Fig. 9. Schematic diagrams of the baroclinic flow. (a) side view, (b) top view.

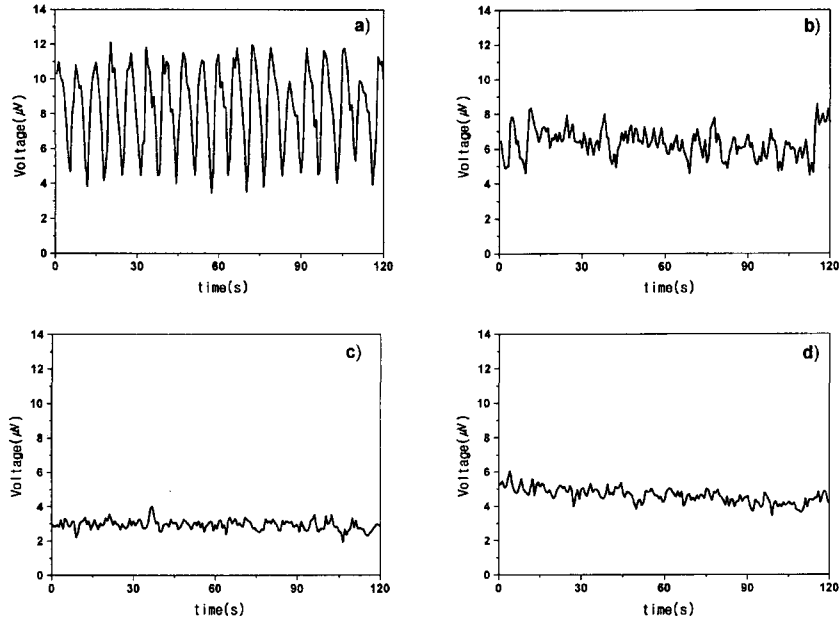


Fig. 10. Induced voltage measured at  $\Omega c = 5$  rpm. a)  $(r, z) = (35, 90)$ , b)  $(70, 90)$ , c)  $(35, 50)$ , d)  $(70, 50)$ .

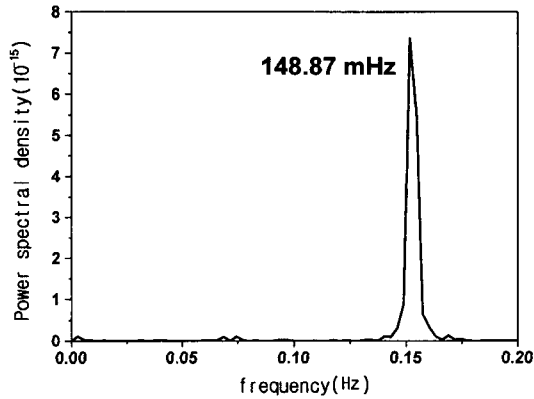


Fig. 11. FFT spectra of velocity data at  $(r, z) = (35, 90)$  ( $\Omega c = 5$  rpm).

은 결정에 가까운 위치 Fig. 10 a)에서 더욱 명확하게 나타난다.

Fig. 11은 속도 변동의 FFT분석을 통해 얻어진 결과이다. 속도 변동은 도가니의 회전 주파수(= 83.3 mHz)보다 큰 주파수인 148.87 mHz를 가지고 있다. Fig. 12는 같은 위치에서 온도 변동과 FFT 분석 결과를 나타낸다. Fig. 12에서 알 수 있는 것처럼 온도 변동의 주파수(146.48 mHz)가 속도 변동 주파수와 거의 일치한다. 이처럼 속도 변동은 온도 변동과 밀접한 관계가 있다. 그리고 열전달의 주요 전달 기구가 대류이기 때문에 온도의 변동은 유동의 변동에 따른 대류 전달의 변화로 생각할 수 있다. 결국 도

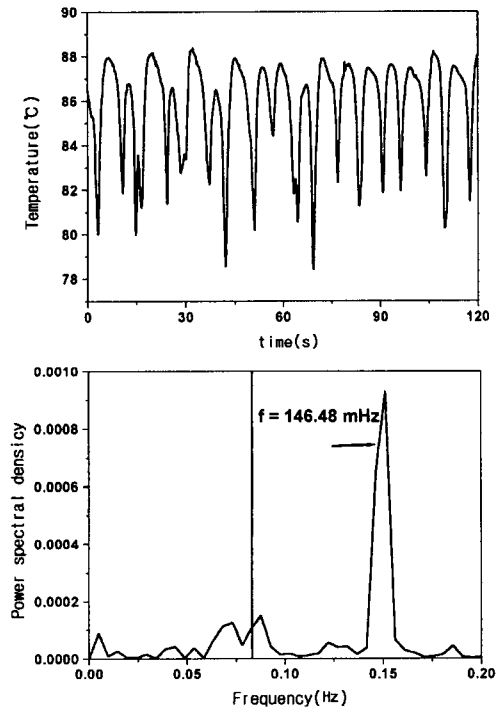


Fig. 12. Temperature profile and FFT spectra of temperature data at  $(r, z) = (35, 90)$  ( $\Omega c = 5$  rpm)

가니 내에서 일어나는 변동의 최초 원인은 속도의 변동이다. 물론 이러한 속도의 변동은 도가니 내의 온도 분포에

따라서 여러 가지 모습으로 나타날 수 있고 초크랄스키 성장 시스템에서는 앞에서 고찰한 바와 같이 baroclinic 불안정성이 나타나는 것이다. 회전방향의 속도 변동이 나타나는 것은 온도 변동에서 고찰한 것처럼 도가니의 회전 속도 증가에 따른 baroclinic 불안정성이 나타나기 때문이다.

일반적으로 baroclinic 불안정성의 발생 여부를 판단하기 위해서 다음의 두 무차원 변수가 사용된다.

Thermal Rossby number (ratio of inertial and viscous force)

$$Ro = g\beta r\Delta T/\Omega^2 R^2$$

Taylor number (ratio of the Coriolis force and viscous force)

$$Ta = 4\Omega^2 r^4/\nu^2$$

여기서  $g$ 는 중력 가속도이며 멜트의 성질인  $\nu$ 와  $\beta$ 는 각각 동점성 계수(kinematic viscosity)와 열팽창 계수(volumetric expansion coefficient)이다. 또한 Cz계에서  $\Omega$ (rad/s),  $R$ ,  $r$  그리고  $\Delta T$ 의 값으로는 각각 도가니의 회전 속도, 도가니 반경, 멜트의 깊이 그리고 멜트 내부에서 가장 큰 온도 차이(= 18°C)를 사용하였다. 본 연구에서는 도가니 회전속도가 4 rpm 이상에서 baroclinic 불안정성이 나타났고, 이때의 도가니 회전 속도를 이용하여 두 무차원 변수를 계산한 결과 baroclinic 불안정성은  $Ro < 1.01$ ,  $Ta > 9.63 \times 10^8$ 인 영역에서 발생하였다.

#### 4. 결 론

본 연구는 저용점 금속을 작동유체로 사용하는 모델 Cz 단결정 성장 시스템에서 도가니의 회전에 따른 baroclinic 불안정성의 발생과 유동현상을 관찰하였다. 일체형 자석 프로브를 이용하여 유속을 측정된 결과 표면에서 멜트의 회

전 속도가 바닥에서의 회전 속도보다 빠르다는 것을 확인하였고, 특히 표면에서의 회전 유속의 경우 결정 근처에서 유속이 증가하는 것을 알 수 있었다. 도가니의 회전 속도를 증가시키면서 온도변동을 관찰한 결과 Pr 수가 작은 Cz 결정 성장 도가니에서는  $Ro < 1.01$ ,  $Ta > 9.63 \times 10^8$ 인 영역에서 baroclinic 불안정성이 나타나는 것을 확인하였고, 이 영역에서 유동과 온도가 동일한 주파수를 가지고 변동하는 것을 실험적으로 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [ 1 ] J.R. Ristorcelli and J. L. Lumley, J. Crystal Growth 116 (1992) 447.
- [ 2 ] M. Watanabe, M. Eguchi, K. Kakimoto and T. Hibiya, J. Crystal Growth 133 (1993) 23.
- [ 3 ] S. Nakamura, M. Eguchi, T. Azami and T. Hibiya, J. Crystal Growth 207 (1999) 55.
- [ 4 ] Y. Kishida, M. Tanaka and H. Esaka, J. Crystal Growth 130 (1993) 75.
- [ 5 ] A. Seidl, G. McCord, G. Müller and H.-J. Leister, J. Crystal Growth 137 (1994) 326.
- [ 6 ] Y.-S. Lee and Ch.-H. Chun, J. Crystal Growth 197 (1999) 297.
- [ 7 ] S.-H. Lee, M.-Ch. Kim and K.-W. Yi, J. Korean Association of Crystal Growth 9 (1999) 149.
- [ 8 ] K.-W. Yi, V.B. Booker, M. Eguchi, T. Shyo and K. Kakimoto, J. Crystal Growth 156 (1995) 383.
- [ 9 ] R. Ricou and C. Vives, Int. J. Heat Mass Transfer. 25 (1982) 1579.
- [ 10 ] H.-C. Lee, J.W. Evans and C. Vives, Met. Trans. 15B (1984) 734.
- [ 11 ] K. Kakimoto, M. Watanabe, M. Eguchi and T. Hibiya, J. Crystal Growth 126 (1993) 435.
- [ 12 ] C.W. Yoo, K. Kakimoto and H. Ozoe, Numerical Heat transfer, Part A 36 (1999) 551.