

## 결정봉 회전 가속화 기법에 의한 초크랄스키 결정 성장

김승태, 최정일, 성형진

한국과학기술원 기계공학과, 대전, 305-701

### Czochralski crystal growth by the accelerated crystal rotation technique

Seung Tae Kim, Jung-Il Choi and Hyung Jin Sung

*Department of Mechanical Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Taejon 305-701, Korea*

요 약 초크랄스키 대류에서의 온도진동 억제에 대한 실험 및 수치해석 연구가 수행되었다. 결정봉 회전 가속화기법을 초크랄스키 성장에 적용시키기 위해 결정봉 회전가속도를( $\Omega = \Omega_0(1 + A \sin 2\pi ft/t_p)$ )로 변화시켰다. 여기서  $A$ 는 가진증폭율,  $f$ 는 가진주파수인자를 나타낸다. 제어이전에 나타나는 고유한 온도진동 주기( $t_p$ )를 근거하여, 무차원 혼합대류인자( $0.217 \leq Ra/PrRe^2 \leq 1.658$ )에 온도진동 감소율을 조사하였다. 또한 제어인자  $A$ 와  $f$ 에 대한 효과를 조사하였다. 용융유동 내의 온도진동 억제 현상을 이해하기 위해 자오면상에 나타나는 온도 및 와도 분포가 면밀히 검토되었다.

Abstract A laboratory experiment was made of a control of temperature oscillation in Czochralski convection. Numerical computation was also made to delineate the control of temperature oscillation. The suppression of temperature oscillation was achieved by varying the rotation rate of crystal rod( $\Omega = \Omega_0(1 + A \sin 2\pi ft/t_p)$ ), where  $A$  denotes the amplitude of rotation rate and  $f$  the frequency factor. Based on the inherent dimensionless time period of temperature oscillation ( $t_p$ ), the suppression rate of temperature oscillation was characterized by the mixed convection parameter  $0.217 \leq Ra/PrRe^2 \leq 1.658$ . The optimal values of  $A$  and  $f$  were also scrutinized. To understand the suppression mechanism of temperature oscillation, the contours of isotherm( $\theta$ ) and equi-vorticity( $\omega$ ) were investigated.

## 1. 서 론

초크랄스키 공정에 의해 성장된 결정의 품질은 용융액 내부의 열유동에 의해 좌우된다고 알려져 있다[1]. 초크랄스키 공정에서의 대류는 주로 결정의 경계면과 도가니 외벽의 온도차에 의한 자연대류와 결정 및 도가니의 회전에 의한 강제대류에 의해 유도되어진다. 두 상이한 대류효과의 상호작용에 의해 용융유동의 내부구조가 복잡해지는데, 이는 온도진동을 유발해 단결정 내에 띠무늬 결함(striation)이 나타나게 된다[2]. 이러한 결함은 성장된 결정의 품질을 저하시켜 결정의 결함에 따라 저항의 변화를 초래하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 결정내에 생성되는 결함을 줄이기 위해 대류유동에 나타나는 온도진동을 억제시키고자 한다.

초크랄스키 대류에서의 온도진동 제어에 관해 살펴보면, 자기장을 적용하여 용융 내부의 대류유동을 억제하는 방법[3], 미소중력(microgravity) 환경에서의 성장 방법[4] 등이 있다. 이와는 달리 Scheel 등[5]은 온도 및 농도장을 균일화하기 위해 효과적인 휘저음(stirring)을 이용하는 방법을 제안하였다. 이는 결정봉 회전 가속화 기법(Accelerated Crystal Rotation Technique, ACRT)로서 알려진 방법이다. 이러한 ACRT 방법은 간단한 전자회로 장치에 의해 결정봉의 회전각속도를 변화시키는 것으로서 종전의 다른 제어방법보다 설치비 및 운영비 면에서 경제적으로 효과적이다. 대부분의 연구자들은 초크랄스키 대류유동에서의 ACRT를 적용함에 있어서 고유한 진동현상의 충분한 이해없이 다루어왔다[6-8]. 최근들어 Choi와 Sung[9]은 기존의 초크랄스키 대류에서 나타나는 동적특성인 고유주기를 바탕으로하여 [10], 결정봉의 회전각속도를 주기적으로 변

화시켰다. ACRT를 적용함으로써 용융유동에 나타나는 온도진동의 억제 가능성을 수치적연구로 밝혔으며, 그 억제조건은 제어이전의 온도진동 고유주기와 밀접한 관련이 있음을 명시하였다.

본 연구에서는 Choi와 Sung[9]의 수치적 연구에 대한 실험적 검증 및 온도진동의 억제 원인을 규명하는 것이 그 목적이다. ACRT를 적용하기 위해 결정봉의 회전각속도를  $\Omega = \Omega_0(1 + A \sin(2\pi ft/t_p))$ 로 시간적으로 변화시켰다. 여기서  $\Omega_0$ 는 ACRT를 적용하지 않았을 때의 회전각속도이며,  $t_p$ 는 용융유동에 나타나는 고유주기를 의미한다. ACRT에 대한 제어인자, A와 f에 따른 온도진동을 줄일 수 있는 최적조건에 대한 평가를 하였다. 여러가지 혼합대류인자,  $Ra/PrRe^2 = 0.217, 0.652, 1.658$ 에 대해 ACRT를 적용하여 열유동 구조의 변화에 따른 온도진동 감소 메커니즘을 해석하였다.

## 2. 실험 장치

초크랄스키 공정을 모사하기 위한 실험장치의 개략적 모형도는 Fig. 1과 같다. 도가니는 유동 및 온도장을 관찰하기 위해 환형 Pyrex glass로 만들어졌으며, 그 반경은 71.5 mm이고 두께는 3.5 mm이다. 결정경계면의 모형은 반경 35.8 mm의 알루미늄 박판으로 만들어졌다. 도가니 외벽 및 모형결정에 대한 온도조건을 균일하게 유지하기 위해 항온조의 물을 순환시킴으로써 도가니 외벽의 온도는  $30 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 로 결정경계면에서의 온도는  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 가 되도록 제어하였다. 이에 대해 도가니 내부의 작동유체로서는 실리콘 오일이 쓰여졌으며,  $25^\circ\text{C}$ 에서의 그 물성치들은 Table 1에 나열되어 있다.

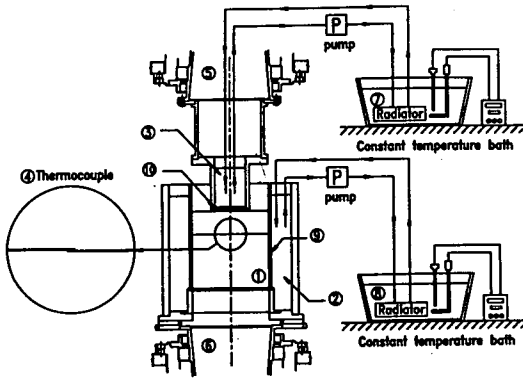


Fig. 1. Schematic diagram of apparatus: (1) silicon oil (2) heated water (3) cooled water (4) thermocouple (5) rotating frame of model crystal (6) rotating frame of crucible (7) constant temperature bath (cold) (8) constant temperature bath (hot) (9) crucible (10) aluminum disk plate.

Table 1

Properties of fluid

Properties	Silicon oil
Kinematic viscosity( $\nu$ , $m^2/s$ )	$5.0 \times 10^{-4}$
Thermal diffusivity( $\alpha$ , $m^2/s$ )	$1.1 \times 10^{-7}$
Volumetric coefficient( $\beta$ , $K^{-1}$ )	$9.4 \times 10^{-4}$

결정봉 회전각속도의 정현파 특성인 주파수와 증폭인자를 제어하기 위해 가진 증폭기(power amplifier)와 함수발생기(functional generator)가 설치되었다. 또한 전자적 신호에 의해 회전각속도를 0.7% 오차이내로 제어 가능한 회전식 인코더(rotary encoder)가 설치되었다. 회전축의 편심운동과 수직방향의 진동을 제어하기 위해 회전구름 베어링(angular-roll bearing) 장치가 사용되었다. 정밀 베어링 장치(JISP4-Class)에 의한 고속회전을 억제하기 위해 강제-순환 운

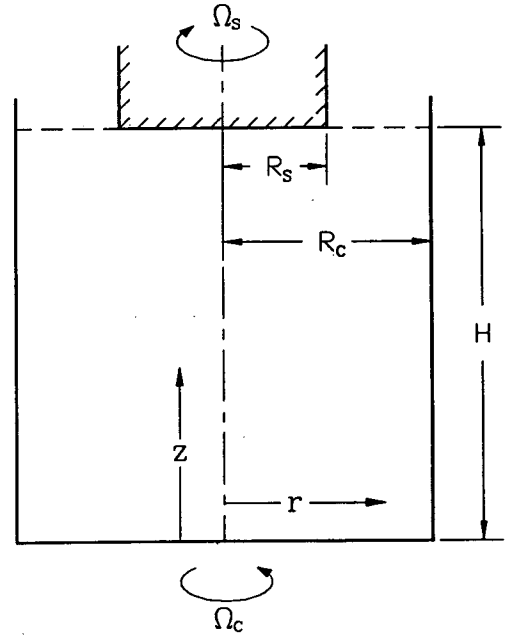


Fig. 2. Model of Czochralski growth.

활방법이 사용되었다. 속도제어와 큰 토크 장치에 적합한 AC 서보 모터(Nikki Denso Co., 7.5 kW, NA 20-370F)가 파워드라이브로서 사용되었다.

도가니 내에 나타나는 온도진동은 모형결정으로부터 42.9 mm 아래에 설치된 0.1 mm 직경의 L형 열전대(thermocouple)에 의해 측정되었다.

### 3. 수치해석방법

초크랄스키 성장에 관한 기하학적 모형을 Fig. 2에 나타내었다. 용융유동은 축대칭 특성을 유지하고 있으며, 결정봉의 성장속도가 매우 작고, 결정경계면이 평면으로 유지되고 있다고 가정하였다. 도가니내의 용융유동에 대한 비정상 점성유동에 대한 무차원화된 지배방정식을 유선와도 방법(stream-vorticity

method)을 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(u\omega)}{\partial r} + \frac{\partial(w\omega)}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \Gamma \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right] + \frac{\text{Ra}}{\text{PrRe}^2} r \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{2\Gamma}{r^2} \frac{\partial \Gamma}{\partial z} + \frac{u\omega}{r}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial(u\Gamma)}{\partial r} + \frac{\partial(w\Gamma)}{\partial z} = \frac{1}{\text{Re}} \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \Gamma}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial z^2} \right] - \frac{u\Gamma}{r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(ru\theta)}{\partial z} + \frac{\partial(w\theta)}{\partial z} = \frac{1}{\text{PrRe}} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \frac{\omega}{r}. \quad (4)$$

여기에서, 자오면상의 유선함수(stream function,  $\psi$ ), 와도 (vorticity,  $\omega$ )와 속도와의 관계를 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{\omega}{r} = \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{\partial u}{\partial z}, \quad u = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z}, \quad w = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \quad (5)$$

무차원 변수들에 대해서는 이전의 Choi와 Sung[9]의 연구와 마찬가지로 다음과 같이 정의하였다 ;  $(r, z) = (r^*, z^*)/H$ ,  $t = t^* \Omega_0$ ,  $(u, v, w) = (u^*, v^*, w^*)/(\Omega_0 H)$ ,  $\theta = (T - T_c)/(T_H - T_c)$ . 여기서 \*는 차원화된 양이다. 이에 대해 무차원 온도 ( $\theta$ )는 도가니 외벽온도 ( $T_H$ )와 결정경계면에서의 용융온도 ( $T_c$ )에 의해 정의되었다. 시간척도는 ACRT를 적용하기 이전의 결정봉의 회전각속도( $\Omega_0$ )의 역수로 설정되었으며, 길이척도는 도가니의 높이 H로 선택되어졌다. 이에 대한 속도 성분 ( $u, v, w$ )는 원통형 좌표계( $r, \theta, z$ )에서 방사상(radial), 축대칭(azimuthal), 축방향

(axial) 속도를 나타내며,  $\Gamma$ 는 선회속도(swirl velocity), 즉  $\Gamma = rv$ 를 나타낸다.

지배방정식 상에 나타나는 3가지 무차원 인자, Pr, Ra, Re는 각각 다음과 같다. Ra 수는 부력과 점성력의 비를 의미하는 레이레이 수로서  $\text{Ra} = \beta g (T_H - T_c) H^3 / (\alpha \nu)$ 이고, Re 수는 결정봉의 회전각속도에 대한 레이놀즈 수로서  $\text{Re} = \Omega_0 H^2 / \nu$ 이며, Pr 수는  $\text{Pr} = \nu / \alpha$ 이다.

ACRT를 적용하기 위해 결정 경계면에서의 선회속도 ( $\Gamma$ )를  $\Gamma = (1 + A \sin(2\pi ft/t_b))r^2$ 로 정의하였다. 여기서  $t_b$ 는 ACRT를 적용하기 이전에 나타나는 용융유동의 온도진동에 관한 무차원 시간주기이다. 자유표면에서의 Marangoni 대류효과는 아주 미약하다고 가정하였으며, 이에 대한 선회속도의 조건으로서 그 표면에서의 수직방향 변화율이 없다고 정의하였다.

본 연구에서는 유한차분법에 기초를 둔 수치해석방법을 사용하였으며, 모든 계산은  $41 \times 81$ 의 밀집 격자계에서 행해졌다. 비정상문제에 대한 초기조건으로는 도가니와 결정봉의 회전이 없는 자연대류조건인 수렴해를 사용하였다. 무차원 변수들의 반복계산 간의 최대오차가  $10^{-4}$ 까지 계산되었다. 본 연구에 대한 자세한 수치방법은 Choi와 Sung[9]의 연구에 잘 나타나 있다.

#### 4. 결과 및 토론

초크랄스키 공정에서의 온도진동 특성은 무차원 변수인 혼합대류인자( $\text{Ra}/\text{PrRe}^2$ )에 의해 특성화될 수 있다. 혼합대류인자는 자연대류와 강제대류와의 상대적 중요성을 나타내며, 각 유동구조에 따라 온도진동의 패턴이 상이함을 전술한 바 있다[11].

본 연구에서는 혼합대류인자에 의거하여 이전의 ACRT에 의한 온도진동 억제에 대한 수치적 연구[9]의 실험적 검증 및 억제 현상에 대한 원인을 찾아내는 것이 그 목적이다.

본 연구에서는 작동유체로서 실리콘 오일이 사용되었으며, 이에 상응하는 무차원 변수는  $Ra=4.83 \times 10^6$ ,  $Pr=4445$ 이다.

초크랄스키 대류에서의 혼합대류인자에 따른 온도진동의 무차원 주기( $t_p$ )를 Fig. 3에 나타내었다. 용융유동 내의  $t_p$ 는  $(r,z)=(0.0, 0.7)$ 에서의 온도진동의 주기를 측정함으로써 얻어졌다.

자연대류가 지배적인 영역에서는 혼합대류인자가 커짐에 따라( $Ra/PrRe^2 \geq 0.6$ ),  $t_p$ 는 점차적으로 감소한다. 강제대류가 지배적인 영역( $Ra/PrRe^2 < 0.4$ )에서도 혼합대류인자가 증가함에 따라  $t_p$ 는 감소한다[11].

ACRT에 의한 영향을 조사하기 위해, Fig. 3에 나타난 여러가지 혼합대류인자에 대해  $Ra/PrRe^2=0.217, 0.652, 1.658$ 가 선택되었 으며, 이에 대해 점원으로 나타내었다.

4.1. 자연대류가 지배적인 영역( $Ra/PrRe^2=1.658$ )

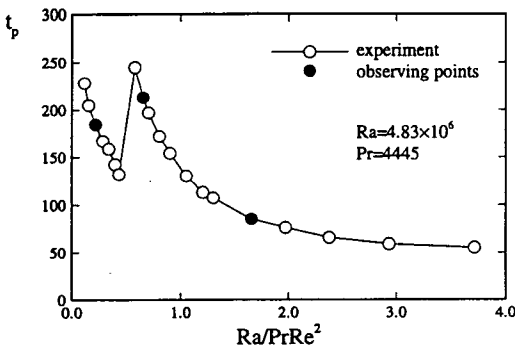


Fig. 3. The time period ( $t_p$ ) of temperature oscillation for  $Pr=4445$ ,  $Ra/PrRe^2=4.83 \times 10^6$  Solid circles represents the observing points of ACRT.

Fig. 4는 자연대류가 지배적인 영역( $Ra/PrRe^2=1.658$ )에서의 ACRT에 의한 효과를 알아보기 위한 온도진동의 시간이력곡선이다. ACRT에 따른 온도진동 억제에 대한 최적조건을 찾아내기 위해 본 연구에서는 ACRT 제어인자들을  $0.0 \leq A \leq 0.5$ ,  $0.9 \leq f \leq 1.1$ 로 변화시켰다.

이 경우 실험적 관찰에서의 ACRT제어인자의 최적 조건은  $A=0.3, f=0.96$ 로 나타났으며, 수치해석에서는  $A=0.3, f=0.9$ 로 나타났다. 실험적 결과와 수치적 예측의 결과는 서로 잘 일치함을 볼 수 있으나, ACRT에 의한 온도진동 억제 효과는 미약함을 알 수 있다. 이는 ACRT에 의한 회전각 속도의 변화율이 작으므로, 전반적인 용융유동이 부력에 의해 지배되어지기 때문이다.

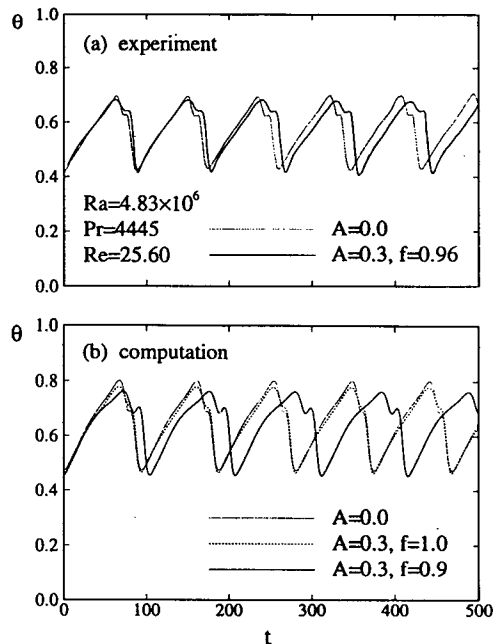


Fig. 4. The effect of ACRT on temperature oscillation at  $(r,z)=(0.0,0.7)$  for  $Ra/PrRe^2=1.658$  (a) experiment (b) computation.

4.2. 자연대류와 강제대류가 상응하는 영역 ( $Ra/PrRe^2=0.652$ )

Fig. 5는 자연대류와 강제대류가 비교적 상응하는 영역( $Ra/PrRe^2=0.652$ )에서 ACRT의 온도진동에 대한 영향을 나타낸 것이다. ACRT의 최적 제어조건은 실험의 경우,  $A=0.3$ ,  $f=0.99$ 이며, 수치해석에서는  $A=0.3$ ,  $f=0.95$ 로 나타났다. 대체적으로 ACRT에 의해 자연대류가 지배적인 영역( $Ra/PrRe^2=1.658$ )에서의 온도진동 감소율 보다는 크게 나타났다. 이전의 연구[11]에서 언급된 바와 같이, Ekman흡입에 의해 결정봉의 중심부분에서 열유동의 결정봉 아래로 밀집되는 시간 동안, ACRT에 의해 회전각속도가 감소됨에 따라 부력의 상대적 효과가 증가되어 온도진동의 최대값이 감소되기 때문이다.

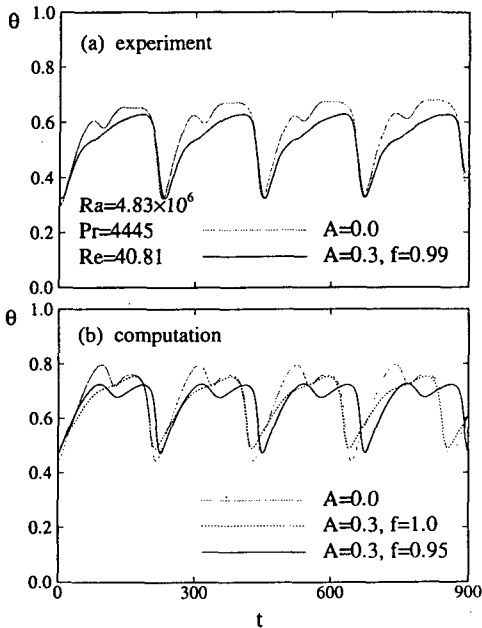


Fig. 5. The effect of ACRT on temperature oscillation at  $(r,z)=(0.0,0.7)$  for  $Ra/PrRe^2=0.652$ (a) experiment (b) computation.

ACRT의 최적조건에 대한 고찰을 하기 위해 Fig. 6에 제어인자에 따른 온도 진동 감소율을 나타내었다. ACRT에 의한 온도진동 억제 효과를 정량화하기 위해 온도진동 감소율  $(1-\Delta\theta/\Delta\theta_0)$ 을 정의하였다. 여기서  $\Delta\theta_0$ 는 ACRT를 적용하지 않은 경우, 즉  $A=0$ 인 경우에서의 온도진동의 최대값과 최소값의 차이를 나타내며,  $\Delta\theta$ 는 ACRT에 의한 온도진동의 진폭을 나타낸다. Fig. 6(a)는 ACRT에 의한 회전가속도의 가진증폭율,  $A$ 에 대한 온도진동 감소율을 나타낸 것이다. 여기서 가진주파수인자,  $f=1.0$ 이다. 온도진동 감소율의 최대치는  $A=0.3$ 에서 나타나며, 그 감소율은 약 27% 정도임을 알 수 있다.  $A=0.3$ 으로 고정시키고,  $f$ 에 따른 온도진동 감소율을 Fig. 6(b)에 나타내었다. 온도진동의 최대 감소율은  $f=0.95$ 에서 약 30% 정도

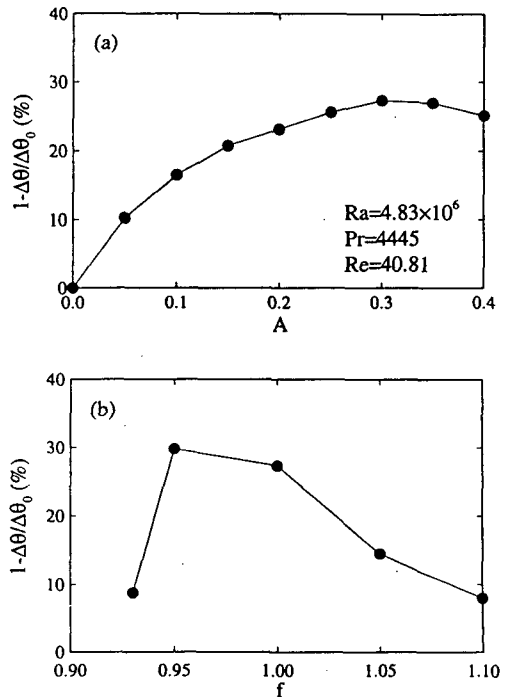


Fig. 6. The suppression rate of temperature oscillation as functions of  $A$  and  $f$ .

로 나타났다. ACRT를 적용하기 이전에 나타나는 용융유동의 고유주기 ( $t_b$ ) 부근에서 온도진동을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

온도진동 감소현상을 면밀히 검토하기 위해 용융유동 내부에서 나타나는 와도와 결정봉의 회전각속도 변화의 상관성에 의거하여 설명하고자 한다. Fig. 7은 ACRT를 적용하지 않았을 때 ( $A=0$ )의 자오면상의 온도분포 ( $\theta$ )와 와도분포 ( $\omega$ )를 나타내고 있다. 용융유동 내부에서 발생하는 차가운 열유동 (cold plume)의 생성, 변화 및 소멸은 와도분포와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다. Fig. 7(b)를 보면 전체적인 와도분포는 크게 3개로 구성되어 있음을 알 수 있다. 이에 대해 결정봉의 중심축 아래의 큰 와도를 거시적인 자연대류에 의한 buoyant vorticity (반시계방향), 결정봉의 회전에 의해 결정봉 중심부 아래로 밀집된 와도를 rotation vorticity(시계방향), 결정봉 가장자리에서 발생하는 와도를 interactive vorticity라 정의하고자 한다. Interactive vorticity는 부력에 의한 힘과 Coriolis 힘의 평형에 의해 생성된다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이,  $t=0$ 일 때, rotation vorticity와 interactive vorticity 사이에서 차가운 열유동은 생성되며, 두 와도의 경계를 따라 아래로 밀려 내려오기 시작한다.

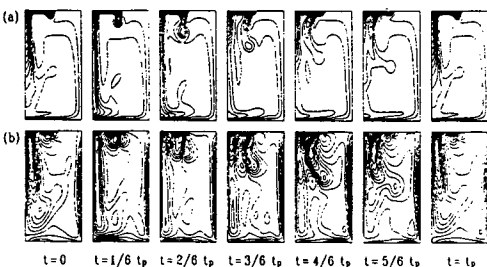


Fig. 7. Contour plots of isotherms ( $\theta$ ) and equi-vorticity ( $\omega$ ) in the meridional plane for  $Ra/PrRe^2=0.652$ .  $A=0$ .

Buoyant vorticity에 의해 중심축 부근의 열유동은 결정경계면 아래의 차가운 열유동을 끌어내려 중심축 부근에서의 온도 기울기를 완만하게 되어  $(r,z)=(0.0,0.7)$ 인 관찰점에서의 온도는 Fig. 9(a)에서 보듯이 최소값을 나타내게 된다.  $1/6t_b \leq t \leq 3/6t_b$ 에서는 rotation vorticity와 interactive vorticity 사이에서 생성된 차가운 열유동의 중심에서의 양방향의 온도차에 의해 국소적인 부력이 발생한다. 오른쪽 온도기울기에 의해 열유동은 용융내부의 안쪽으로 이동하려는 특성을 지니며, 왼쪽 온도기울기에 의해 거시적 자연대류성분이 약화되어 결정 경계면 아래의 rotation vorticity가 증가된다. 이러한 rotation vorticity의 성장에 의해 buoyant vorticity는 결정봉 아래로 밀집되고, 결정경계면 아래에서 온도기울기가 증가되어, 결정 경계면 중심하단부의 온도는 증가된다. 이는 결정경계면 아래의 rotation vorticity의 성장에 따른 상대적인 강제대류 효과가 커져서 회전축 중심부의 온도가 올라가는 과정이다.

$3/6t_b \leq t \leq 4/6t_b$ 에서는 rotation vorticity가 분리된다. 이는 용융액 내부에서 차가운 열유동의 재가열에 의해 온도기울기가 감소되어 상대적 강제대류의 효과가 감소됨에 따라, 결정 경계면 아래로 길게 늘어진 rota-

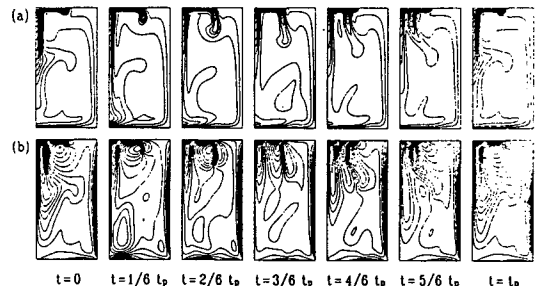


Fig. 8. Contour plots of isotherms ( $\theta$ ) and equi-vorticity ( $\omega$ ) in the meridional plane for  $Ra/PrRe^2=0.652$ .  $A=0.3$ ,  $f=0.95$ .

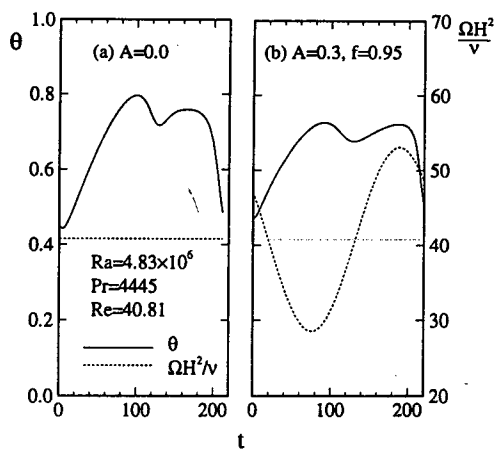


Fig. 9. The relation between the rotation rate of crystal rod ( $\Omega$ ) and temperature oscillation ( $\theta$ )  $Ra/PrRe^2=0.652$  (a)  $A=0$  (b)  $A=0.3, f=0.95$ .

tion vorticity가 도가니 내부의 중앙부분부터 단절되어 압축되기 때문이다. 그러므로 차가운 열유동은 더욱 회전 중심축 방향으로 급속히 이동한다.

반면, 결정봉 가장자리에서는 제2의 rotation vorticity로 성장하게 될 interactive vorticity가 생성된다. 이는 결정봉 가장자리 아래에서 차가운 열유동의 중심축으로의 유입에 의해 공간적인 온도가 최대치가 되기 때문이다.  $4/6t_b \leq t \leq t_b$ 에서는 회전중심축에 존재하는 buoyant vorticity와 interactive vorticity가 병합되어 중심축 아래의 거대한 buoyant vorticity로 성장하게 된다. 그러므로 차가운 열유동은 도가니 바닥면까지 이동하게 되어, 중심축 아래의 온도기울기가 급속하게 완만하게되어 차가운 열유동을 소멸시킨다. 또한 rotation vorticity는 buoyant vorticity의 병합에 의해 중심축 부근을 제외한 부분에서 재가열이 되어 결정봉 아래부분에 Ekman층을 다시 형성한다. 이에 대해 새로운 interactive vorticity가 결정봉의 가장

자리에서 생성됨으로써 온도진동이 주기적인 패턴을 지니게 된다. Fig. 8은 ACRT의 제어 인자가  $A=0.3, f=0.95$ 인 경우에 대한 자오면상의 온도분포와 와도분포이다. 또한 ACRT의 적용에 따른 결정봉의 회전각속도 변화와 이에 해당하는 온도진동 시간이력을 Fig. 9(b)에 나타내었다.  $t=0$ 일 때, Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이, ACRT를 적용함으로써 기존의 회전각속도 보다 빠른 결정봉의 회전에 의해 결정봉 아래의 rotation vorticity의 크기가 Fig. 7(b)보다 상대적으로 증가된다. 이에 의해 차가운 열유동은 좀 더 결정봉의 가장자리 끝쪽에서 생성되며, 이전보다 buoyant vorticity를 중심아래로 밀집시켜 관찰점에서의 온도의 최소값이 증가된다 (Fig. 9(b)).  $1/6t_b \leq t \leq 4/6t_b$ 에서는 차가운 열유동의 생성에 따른 interactive vorticity

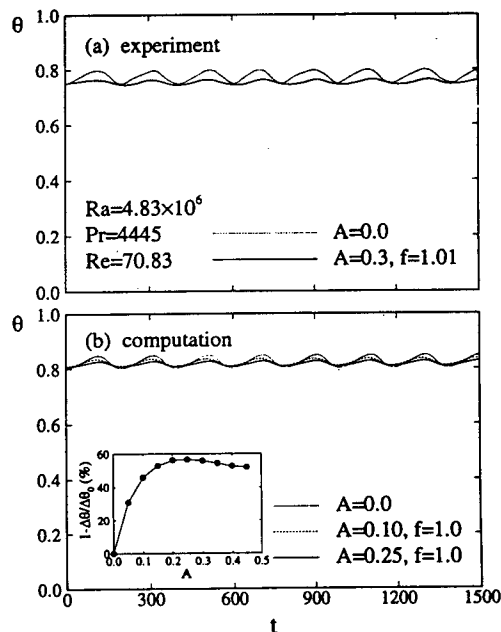


Fig. 10. The effect of ACRT on temperature oscillation at  $(r,z)=(0.0,0.7)$  for  $Ra/PrRe^2=0.217$  (a) experiment (b) computation.



의 성장과 더불어 차가운 열유동 자체의 온도 기울기에 의해 상대적 강제대류 효과의 증가에 의해 rotation vorticity가 성장된다. 그러나 결정봉의 회전각속도가 ACRT를 적용하기 이전보다 작으므로 rotation vorticity의 성장이 둔화되고, 결정봉 중심축 아래의 buoyant vorticity의 결정봉 중심아래로의 밀집이 잘 되지않아 중심축 아래에서의 온도 기울기의 증가를 억제시킨다. 그러므로 Fig. 9(b)에서 처럼, 관찰점에서의 온도의 최대값은 이전보다 감소하게 된다.  $4/6t_b \leq t \leq 5/6t_b$ 은 거시적인 자연대류 유동에 의해 rotation vorticity가 결정봉 아래로 압축되며 interactive vorticity가 회전중심축으로 밀려들어오는 구간이다. 이 경우 증가된 회전각속도에 의해 rotation vorticity를 상대적으로 증가시키기 때문에 이전의 경우보다 buoyant vorticity와 interactive vorticity의 병합이 지연된다.  $5/6t_b \leq t \leq t_b$ 에서 두 와도의 병합과 rotation vorticity의 소멸이 이루어진다. 이는 증가된 회전각속도에 의해 결정봉의 가장자리 부근에서 제2의 rotation vorticity가 될 새로운 interactive vorticity의 크기가 증가되어 두 와도의 병합을 촉진시키기 때문이다. 그러므로 Fig. 9(b)에서 볼 수 있듯이, 제어이전 보다 온도는 빨리 내려감을 알 수 있다. 이 경우 rotation vorticity가 증가되고 중심축 아래로의 buoyant vorticity를 좀 더 밀집시킴으로써 온도의 최소값이 다소 증가된다.

#### 4.3. 강제대류가 지배적인 영역( $Ra/PrRe^2=0.217$ )

Fig. 10은 강제대류가 지배적인 영역 ( $Ra/PrRe^2=0.217$ )에서 ACRT를 적용했을 때의 온도진동을 나타낸 것이다. 가진주파수인자를 1.0으로 고정시키고, A를 변화시킴에

따라 ACRT의 영향을 살펴보았다. 실험의 경우,  $A=0.3$ ,  $f=1.01$ 에서 온도진동 감소율은 67%로 관찰되었다. 또한 수치해석에서도 유사하게  $A=0.25$ ,  $f=1.0$ 에서 57% 정도로 온도진동을 감소되었다. Choi와 Sung [9]가 언급한대로, 강제대류가 지배적인 영역에서 ACRT에 의한 온도진동 억제가 자연대류가 지배적인 영역에 비해 더욱 효과적으로 나타났다.

ACRT를 적용하지 않았을 때 ( $A=0$ )의 온도 및 와도분포를 Fig. 11에 나타내었다. 이전의 연구[11]를 살펴보면, 강제대류가 지배적인 영역에서는 결정경계면 아래에서 회전에 의한 재순환영역이 존재한다. 이에 대해 Fig. 11(b)의 와도분포에서 보면, 중심축 아래의 거대한 buoyant vorticity는 발견되지 않음을 알 수 있다. 따라서 온도진동 패턴은 rotation vorticity와 interactive vorticity의 두 와도에 의해 지배된다.  $0 \leq t \leq 3/6t_b$ 에서 rotation vorticity에 의해 도가니 벽면으로부터 열유동의 유입에 의해 중심축 부근의 온도를 증가시키게 된다. 이에 따라 국소적인 온도차에 의해 rotation vorticity의 발달을 촉진시킨다. 한편, 결정경계면의 가장자리와 자유표면에서의 온도차에 의해 차가운 열유동을 생성하게 되는데, 이에 따라 결정봉 가

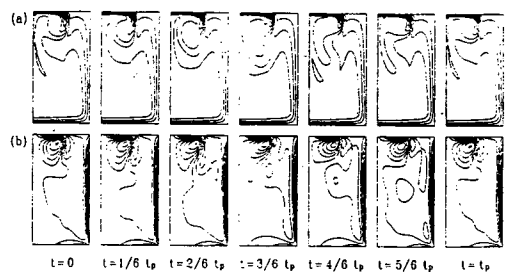


Fig. 11. Contour plots of isotherms ( $\theta$ ) and equi-vorticity ( $\omega$ ) in the meridional plane for  $Ra/PrRe^2=0.217$   $A=0$ .

장자리에서 interactive vorticity를 성장시킨다.  $4/6t_b \leq t \leq t_b$ 에서는 interactive vorticity가 활성화됨에 따라, rotation vorticity가 감소되고 도가니 벽면으로부터 열유동의 유입이 둔화되어 중심축 부근의 온도는 감소된다 (Fig. 13(a)). 그러므로 용융유동의 내부에서는 국소적인 온도기울기가 작아짐에 따라 interactive vorticity의 크기가 감소하여  $t=t_b$ 에서 다시 rotation vorticity가 회복된다. 이러한 일련의 과정에 의해 용융유동 내부에서의 온도진동은 발생하게 된다.

ACRT의 최적조건 ( $A=0.25, f=1.0$ )인 경우에 대해 온도 및 와도분포를 Fig. 12에 나타내었다.  $t=0$ 일 때, Fig. 13(b)에서 보듯이, 결정봉의 회전각속도가 이전 보다 낮은 상태이므로 상대적 자연대류 영향의 증가하여, interactive vorticity의 크기가 증가된다.  $1/6t_b \leq t \leq 4/6t_b$ 에서는 회전각속도가 증가되는 구간으로서 interactive vorticity의 크기를 약화되며, rotation vorticity는 중심축 부근에서 도가니 벽면으로 ACRT를 적용하기 이전보다 더욱 밀려나게 된다. 그러므로 결정경계면 아래의 열유동의 유입은 작아지며, 온도의 최대값은 감소하게 된다.  $4/6t_b \leq t \leq t_b$ 에서는 interactive vorticity가 중심축 부근으로 이동됨에 따라 온도가 내려가게 된다. 이 경우 ACRT를 적용이전 보다 회전각속도가 감소되어 자연대류의 영향을 상대적으로 증가시켜 interactive vorticity를 증가시키고, rotation vorticity를 둔화시킨다.

그러나 회전각속도에 의해 상대적으로 증가된 자연대류 영향이 중심축 부근에 생성되는 rotation vorticity의 영향을 미약하기때문에 ACRT를 적용하기 전과 유사한 rotation vorticity가 유지된다. 그러므로 ACRT에 의한 온도의 최소값의 변화가 미소함을 알 수 있다 (Fig. 13(b)).

### 5. 결 론

본 연구에서는 ACRT에 의한 온도진동 억제에 대한 연구가 실험 및 수치해석을 통하여 수행되어졌다. ACRT에 의한 온도진동 감소율  $(1 - \Delta\theta/\Delta\theta_0)$ 이 무차원 혼합대류인자  $(Ra/PrRe^2)$ 에 대해 조사되었다. 자연대류가 지배적인 영역 ( $Ra/PrRe^2=1.658$ )에서는 ACRT에 의한 온도진동 억제가 미약하지만, 강제대류가 지배적인 영역 ( $Ra/PrRe^2=0.217$ )에서는 온도진동 감소율이 실험적 관

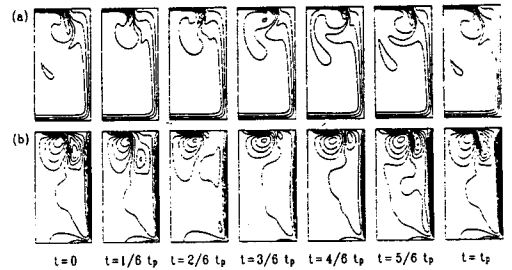


Fig. 12. Contour plots of isotherms ( $\theta$ ) and equi-vorticity ( $\omega$ ) in the meridional plane for  $Ra/PrRe^2=0.217, A=0.25, f=1.0$ .

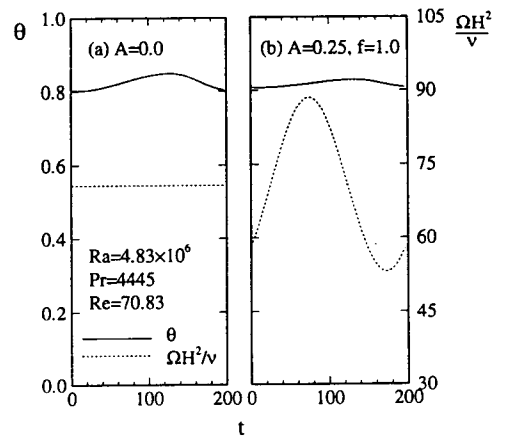


Fig. 13. The relation between the rotation rate of crystal rod ( $\Omega$ ) and temperature oscillation ( $\theta$ ) for  $Ra/PrRe^2=0.217$  (a)  $A=0$  (b)  $A=0.25, f=1.0$ .

찰에 있어서 67 % 정도로 나타났다. ACRT의 제어인자인, 가진중폭율 ( $A$ )와 주파수인자 ( $f$ )에 대한 최적조건에 대한 조사가 수행되어졌다. 실험상에 나타나는 최적조건과 수치해석의 결과가 차이가 있었으나 온도진동의 패턴은 좋은 일치를 보여주고 있다.

$f \approx 1.0$ , 즉 ACRT를 적용하기 이전에 용융유동에 나타나는 온도진동의 무차원 주기 ( $t_p$ ) 부근에서 온도진동을 억제할 수 있었다. 온도진동의 억제 현상에 대한 원인을 규명하기 위해 자오면상의 온도( $\theta$ )와 와도( $\omega$ )분포 및 온도진동과 회전각속도의 시간적변화에 의해 해석되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 '97년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비 (ISRC 97-E-3015)에 의하여 연구되었기에 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [ 1 ] W.E. Langlois, A. Rev. Fluid Mech. 17 (1985) 191.
- [ 2 ] E. Kuroda, H. Kozuka and Y. Takano, J. Crystal Growth 68 (1978) 613.
- [ 3 ] H.P. Utech and M.C. Flemings, J. Applied Physics 37 (1966) 2021.
- [ 4 ] J.R. Carruthers, J. Crystal Growth 42 (1977) 379.
- [ 5 ] H.J. Scheel, J. Crystal Growth 13/14 (1972) 560.
- [ 6 ] H.J. Scheel and H. Mueller-Krumbhaar, J. Crystal Growth 49 (1980) 291.
- [ 7 ] M. Mihelčić, C. Schröck-pauli, K. Wingerth, H. Wenzl, W. Uelhoff and A. Van der Hart, J. Crystal Growth 53 (1981) 337.
- [ 8 ] M. Mihelčić, C. Schröck-pauli, K. Wingerth, H. Wenzl, W. Uelhoff and A. Van der Hart, J. Crystal Growth 57 (1982) 300.
- [ 9 ] J.-I. Choi and H.J. Sung, J. Korean Soc. Mech. Eng. 20 (1996) 2397.
- [ 10 ] H.J. Sung, Y.J. Jung and H. Ozoe, Int. J. Heat & Mass Transfer 38 (1995) 1627.
- [ 11 ] J.-I. Choi and H.J. Sung, J. Korean Assoc. Crystal Growth 7 (1997) 108.