

# 반도체용 핫플레이트 챔버 내 자연대류가 핫플레이트 표면 온도 균일도에 미치는 영향

박준수<sup>†</sup>·권현구<sup>\*</sup>·조형희<sup>\*\*</sup>

## Effects of Natural Convection Cells on Temperature Uniformity in Hot Plate Chamber for Wafer Baking Process

Jun Su Park, Hyun Goo Kwon, Hyung Hee Cho

**Key Words:** Natural Convection(자연대류), Hot Plate Chamber(핫플레이트)  
Temperature Uniformity(온도 균일도)

### Abstract

Effect of natural convection for hot plate surface temperature uniformity was studied by experiments that were adjusted height of chamber and temperature difference. The hot plate chamber is composed of the hot plate and the upper heater and adiabatic vertical wall. The hot plate diameter is 220mm and maintains temperature at 150°C. Flow pattern compares with surface temperature and confirms that natural convection affects on temperature uniformity of hot plate surface. In case, temperature non-uniformity of hot plate surface is due to heater pattern, lots of weak and small flow cells more improve temperature uniformity than stronger flow cells or non-developing flow cell. Improve temperature uniformity 1.2°C when developing weak and small flow cells.

### 기호설명

$g$  : 중력 가속도 (9.8m/s<sup>2</sup>)  
 $H$  : 챔버 높이 (m)  
 $Ra$  : Rayleigh 수  
 $T_1$  : 핫플레이트의 온도 (°C)  
 $T_2$  : 챔버 상판의 온도 (°C)  
 $\Delta T$  : 챔버 상하부의 온도차 (°C)  
 $W$  : 핫플레이트의 x축 방향 길이 (mm)  
 $x$  : 핫플레이트 지름길이  
 $y$  : 핫플레이트에서 챔버 상판까지의 높이  
 $z$  : 핫플레이트의 중심에서의 길이

### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수 (m<sup>2</sup>/s)  
 $\beta$  : 열팽창계수 (K<sup>-1</sup>)  
 $\nu$  : 유체의 동점성계수 (m<sup>2</sup>/s)

### 1. 서론

반도체 웨이퍼는 이온주입공정, 막 증착 공정, 확산공정, 사진공정, 식각공정 등과 같은 다수의 공정들을 거쳐 제조된다. 이러한 공정들 가운데 사진공정은 다시 도포공정, 노광공정, 현상공정, HMDS(hexamethyl disilane) 처리공정 그리고 공정 등으로 구성된다. 베이크 공정에서는 챔버 내의 핫플레이트 상에 포토레지스트가 도포된 웨이퍼를 장착하여 일정 온도로 포토레지스트를 베이크하는 챔버식 베이크 장치를 사용하게 된다.

† 발표자, 연세대학교 기계공학부 대학원

\* 연세대학교 기계공학부 대학원

\*\* 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

이와 같은 베이크 장치에 있어서 내부에 위치되는 웨이퍼의 온도균일성은 가공하고자 하는 웨이퍼의 여러 가지 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 베이크 장치의 온도 균일성이 향상되면, CD (critical dimension) 균일성이 개선되어 반도체소자의 제조수율을 향상시킨다. 즉, 웨이퍼를 챔버 내에 위치시킨 후 웨이퍼를 얼마나 빠른 시간 내에, 요구되는 온도를 얼마나 균일하게 유지하는가는 웨이퍼의 기계적 특성 변화뿐만 아니라, 반도체 소자의 수율에 직접적인 영향을 미친다.

최근까지는 균일한 온도분포를 얻기 위해서 히터 패턴을 적절하게 설치하는 방법이 고안되고 사용되어져 왔다<sup>(3)</sup>. 그러나 웨이퍼의 크기의 증가 및 공정의 정밀도 향상으로, 공정 시 요구되는 온도 균일도를 히터 패턴만으로 맞추기가 어려워졌다. 특히, 베이킹 시 챔버 내부 자연대류에 의해 발생하는 유동 셀 때문에 적절한 히터 패턴 배치에도 불구하고 국소적으로 표면의 온도차가 나타난다. 국소적인 온도 차이를 줄이기 위해 질소가스를 유입하여 강제대류를 형성하기도 하였다<sup>(4)</sup>. 하지만 이 연구는 경계조건으로 핫플레이트의 표면을 등온 조건으로 하여 실제 히터 패턴에 의한 온도 불균일성을 제대로 반영하지 못하였다.

그래서 본 연구에서는 실제 히터 패턴에 의한 온도 불균일성을 확인하고 챔버 내부의 기체 유동의 모습을 가시화 하였다. 자연대류와 직접적으로 관련 있는 무차원수 Rayleigh수를 각 경우마다 계산하고, 각각의 경우를 실험을 통해 챔버 내 자연대류가 핫플레이트의 표면 온도 균일도에 미치는 영향 및 균일도 향상 방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 200mm 웨이퍼 용 핫플레이트 샘플을 기준 모델로 하여 해석 및 실험을 수행하였다.

## 2. 장치 구성 및 실험 방법

자연대류와 관련된 Rayleigh수(Ra)는 다음과 같다.

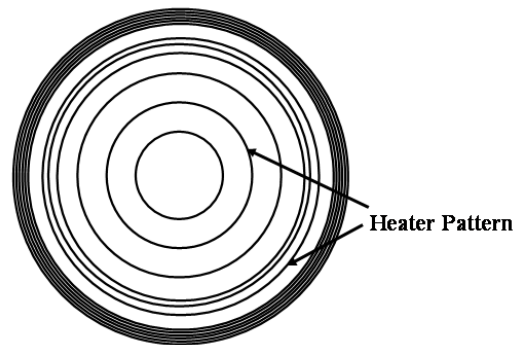
$$Ra = g\beta H^3 \Delta T / \alpha \nu \quad (1)$$

식 (1)의  $g$ 는 중력가속도,  $H$ 는 챔버의 높이,  $\Delta T$  챔버 내부의 온도차,  $\alpha$ 는 열확산계수,  $\beta$ 는 열팽

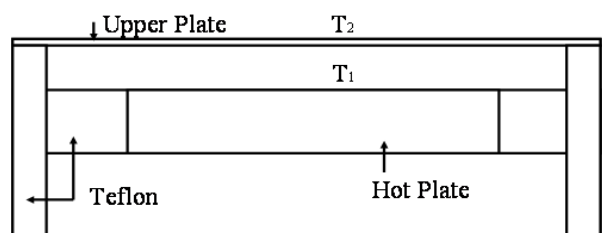
창 계수,  $\nu$ 는 동점성 계수이다.

Rayleigh수 값이 1,700이상에서 유동 셀이 발생한다<sup>(1)</sup>. 유동 셀은 온도가 높은 곳에서 상승하고, 온도가 낮은 곳에서 하강하여 핫플레이트 표면과 충돌을 일으켜 표면의 온도에 영향을 미치게 된다. Ra는 챔버 높이( $H$ )와 챔버 내부의 온도차( $\Delta T$ )에 의해서 결정된다. Ra값을 계산하여 실험을 수행할 챔버의 높이 및 챔버 상하부의 온도차를 결정하였다.

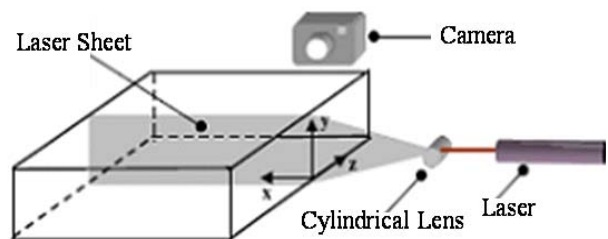
Table 1은 챔버 높이와 챔버내의 온도차를 변화시키면서 Ra값을 계산한 표이다. 일반적인 베이킹 온도인 150℃를 기준으로  $\Delta T$ 를 계산하였다. 실험에 사용한 핫플레이트는 200mm웨이퍼용으로 직경은 220mm이고, 하나의 전원으로 전기적 저항발열을 하는 핫플레이트다. 히터 패턴은 Fig. 1(a)와 같이 운모(mica)로 되어있다. 핫플레이



(a) Pattern of hot plate heater



(b) Hot plate chamber



(c) The visualization arrangement

Fig. 1 Schematic diagram of experiment device

**Table 1** Rayleigh number of each case

$\Delta T$ \ $H$	5mm	10mm	15mm
127°C	626.23	5009.85	16908.24
60°C	196.67	1573.37	5310.13
30°C	82.94	663.52	2239.37

트 챔버의 외벽은 단열을 위해 테플론수지와 챔버 내부의 가시화를 하기 위해 유리를 사용하였다. 챔버의 윗부분에는 히터를 설치하여 챔버 아랫부분의 핫플레이트와 온도차를 조절할 수 있도록 Fig. 1(b)처럼 설계하였다.

표면의 온도를 측정하기 위해 열전대를 표면에 설치하였다. 열전대의 오차를 확인하기 위하여 핫플레이트 표면에 얼음물을 올려놓아서 표면 온도를 0°C로 균일하게 맞춘 후 측정하였다. 또한 열교환기를 이용하여 핫플레이트의 표면의 온도를 90°C로 맞추어 측정하였다. 이 때 발생한 열전대의 두 경우다 온도차는 0.2°C내 이고, 이 값을 이용하여 실험 시 측정된 핫플레이트의 표면의 온도 값을 보정하였다. 그리고 챔버 내부를 가시화하기 위해 핫플레이트 표면에 오일을 바르고 원통 렌즈를 이용하여 레이저 시트를 만들어 내부의 유동을 가시화 하였다. 디지털 카메라(Canon Eos 350D)와 아르곤-이온(Ar-Ion) 이온 레이저(Stabilite 2017 ion laser)를 사용하였고 장치 구성은 Fig. 1(c)처럼 하였다.

케이스마다 유동의 패턴의 변화를 관찰하고, 열전대를 이용하여 측정된 온도와 비교하여 유동의 형상이 표면의 온도에 미치는 영향에 대해서 알아보았다.

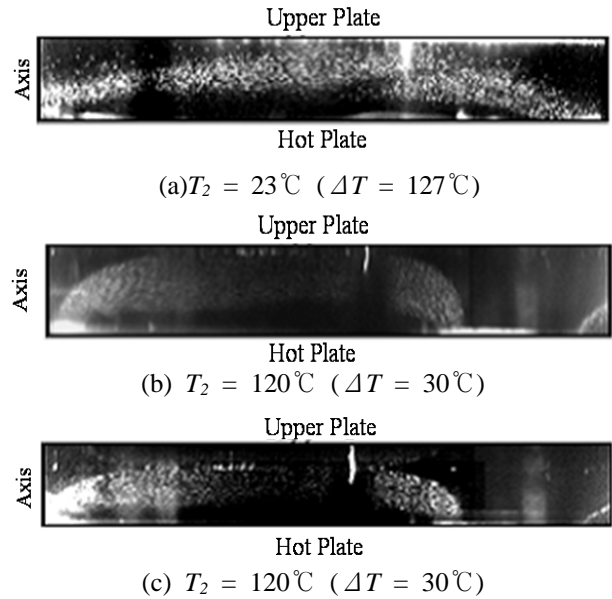
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 $H$ 및 $\Delta T$ 변화에 따른 유동 가시화

Fig. 2는  $H = 5\text{mm}$ 인 경우에 내부 유동을 가시화 한 것이다. 셀은 발생하지 않고, 전체적으로 하나의 유동 흐름이 나타났다. 핫플레이트 중에서 상승하여 외곽부로 흐르면서 하강하였다.

**Table 2** Hot plate Specification

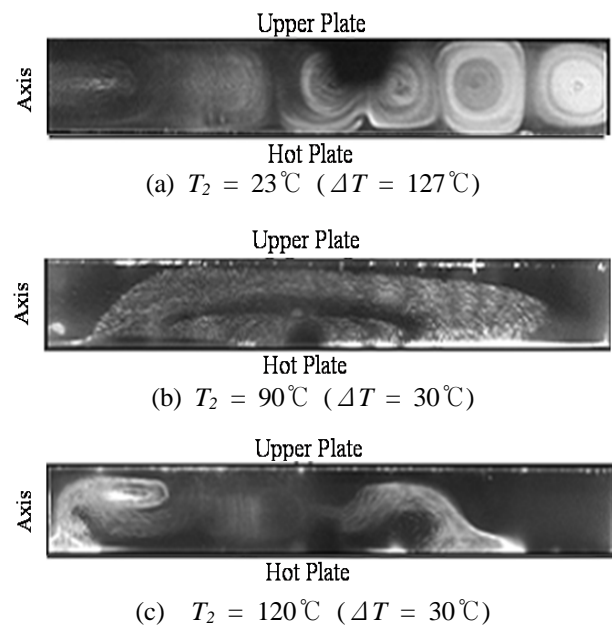
Material	Heater Cartridge	Diameter
Al6061-T6	Mica, 800W, 1.5t	220mm



**Fig. 2** Flow pattern in  $H = 5\text{mm}$

그러나  $\Delta T$ 가 변해도 내부 유동 패턴은 크게 변하지 않았으나,  $\Delta T$ 가 감소할 때 유속이 느려지는 것은 확인 할 수 있다.

Fig. 3은  $H = 10\text{mm}$ 일 때의 내부 유동의 모습이다.  $H = 10\text{mm}$ 일 때,  $\Delta T$ 의 변화를 시킬 때, Rayleigh수 변화에 따른 유동의 모습을 확인할 수 있다.  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 는 Rayleigh수가 1,700이 넘는다. 이 때, 온도가 높은 부분에서 상승하고, 온도가 낮은 부분에서 하강하여 유동 셀이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나  $\Delta T$ 가 증가할수록



**Fig.3** Flow pattern in  $H = 10\text{mm}$

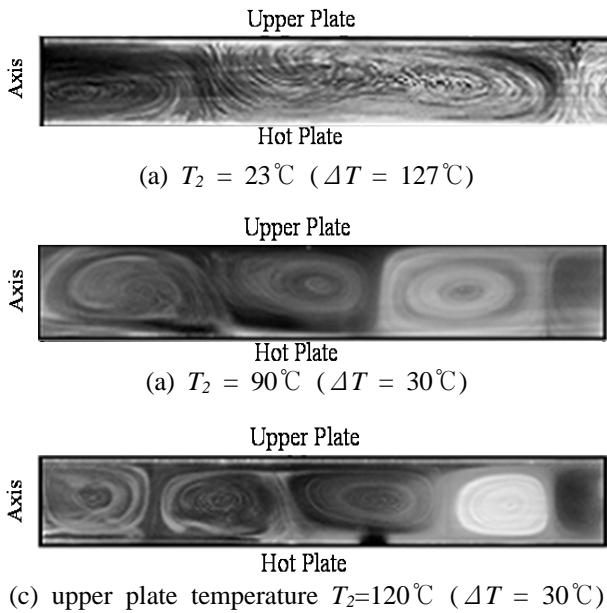


Fig. 4 Flow pattern in  $H = 15\text{mm}$

Rayleigh수가 감소하여 유동 셀이 발생하지 않았다.

그리고  $H = 5\text{mm}$ 일 때와 마찬가지로 전체적으로 핫플레이트 중앙에서 외곽으로 흐르는 유동이 발생하였다.

Fig. 4는  $H = 15\text{mm}$ 일 때의 내부 유동의 모습이다.  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 일 때는  $H = 10\text{mm}$ 일 때와 비교하여 유동 셀이 매우 크고 강하게 생기는 것을 확인할 수 있다. 그리고  $\Delta T$ 가 감소할수록 유동의 크기가 점점 작아지고 유속이 느려지는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 정상 상태에서의 온도 측정결과

핫플레이트 표면에 설치한 열전대를 이용하여 정상 상태에서 측정한 표면의 온도 분포는 핫플레이트 히터 패턴과 비슷한 경향을 보여주고 있다. 히터가 지나가는 부분에서 상대적으로 온도가 높고, 히터 간의 간격이 멀리 떨어져 있는 부분에서는 상대적으로 온도가 낮게 측정되었다.

Table 3은 정상 상태에서의 표면의 온도 편차이다. 온도 편차는  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 일 때  $0.748^\circ\text{C}$ 로 제일 우수했고,  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 일 때  $1.728^\circ\text{C}$ 로 제일 나빴다. 각각의 경우마다 다른 온도 편차가 발생하는 것은 다른 유동의 패턴이 챔버 내에서 발생하였기 때문이다.

Fig. 5는  $H = 5\text{mm}$ 일 경우 핫플레이트 표면의 온도이다. 온도 분포는  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 일 때 제일 고른 온도를 보여주고 있다.

Fig. 6은  $H = 10\text{mm}$ 일 때 측정한 온도이다.  $\Delta T$

Table 3 Temperature difference on hot plate surface in steady state

$\Delta T$ \ $H$	5mm	10mm	15mm
127°C	1.273°C	1.075°C	1.728°C
60°C	0.980°C	1.018°C	0.748°C
30°C	0.988°C	1.053°C	0.921°C

=  $127^\circ\text{C}$ 일 때를  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 일 때와 비교하면 유동 셀의 영향으로 온도가 고르지 못하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 유동 셀의 영향으로  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 일 때,  $H = 5\text{mm}$ 일 때와 비교하면 최고 온도가 낮아져서 전체적인 온도 편차가 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은  $H = 15\text{mm}$ 일 때 측정한 표면의 온도이다.  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 일 때는 제일 큰 온도 편차를 보여준다. 강한 유동 셀의 영향으로 다른 경우에 비해 온도가 고르지 못한 것을 확인할 수 있다. 셀이 약해지고 작아진  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ 일 때는 매우 고른 온도 분포를 보여주고 있다.

전체적으로 Rayleigh수가 감소하는 경우일수록 즉,  $\Delta T$ 가 감소하고,  $H$ 가 작아질수록 유동 셀의 크기가 작아지고 유속이 느려지는 것을 가시화를 통해서 확인할 수 있었다. 유동의 세기가 약해질수록 표면의 온도가 고르게 나타나게 된다. 또한 셀이 생기면서 국소적으로 온도 편차가 발생하는 것을 온도 측정에서 확인할 수 있었다. 그러나 셀의 발생에 의한 국소적인 온도 편차는 표면의 최대 온도 값과 최소 온도 값의 차에 비해 작게 나타난다. 오히려 약하고 작은 셀이 생길 경우

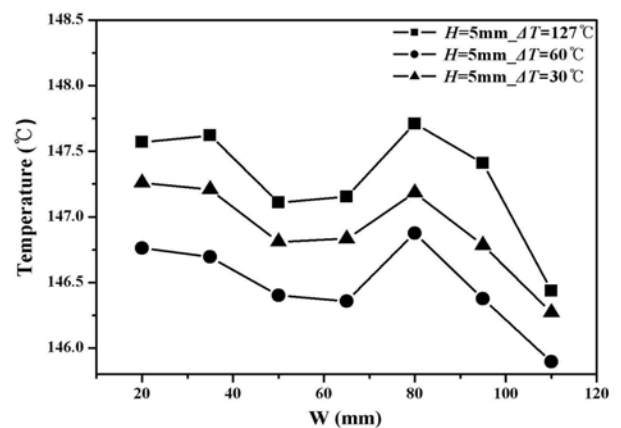


Fig. 6 Temperature distribution at hot plate surface with various temperature difference :  $H = 5\text{mm}$

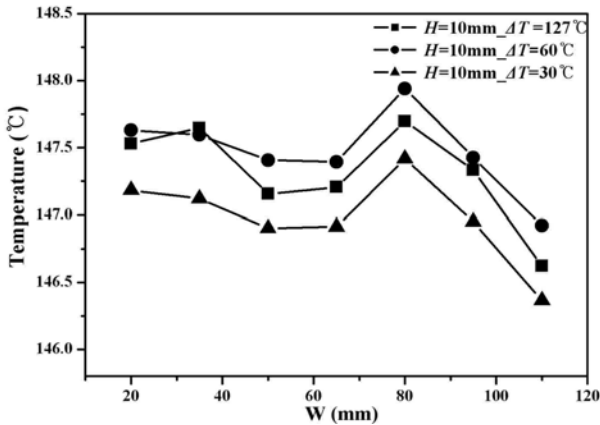


Fig. 6 Temperature distribution at hot plate surface with various temperature difference :  $H = 10\text{mm}$

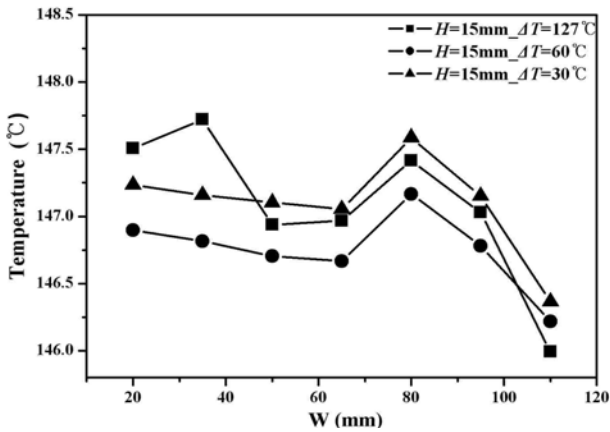


Fig. 7 Temperature distribution at hot plate surface with various temperature difference :  $H = 15\text{mm}$

온도 편차가 셀이 생기지 않은 경우보다 작게 측정 되었다.

온도차가 줄어들거나 챔버 높이가 낮아지면 Rayleigh수는 감소한다. 유동은 안정적인 상태이고, 핫플레이트 챔버 위로 상승한 후 중앙에서 외곽으로 흐르게 된다. 유동이 외곽으로 흐르는 동안 상판과 열 교환을 하게 된다. 기체의 유속이 느릴 경우 핫플레이트 중앙에서 끝으로 흘러가는 시간이 길어져 열 교환이 많이 이루어져 결국 유동이 떨어지는 끝부분의 표면 온도를 많이 떨어뜨리게 된다. 또한 유동 셀이 생기는 경우엔 내부 유동의 믹싱이 활발히 이루어져 표면의 최고 온도를 낮춰 온도 편차가 작아진다.

### 3.3 비정상 상태에서의 온도 측정 결과

그래서  $H = 10\text{mm}$ 일 때보다  $5\text{mm}$ 일 때,  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 일 때보다  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 챔버 내부의 유

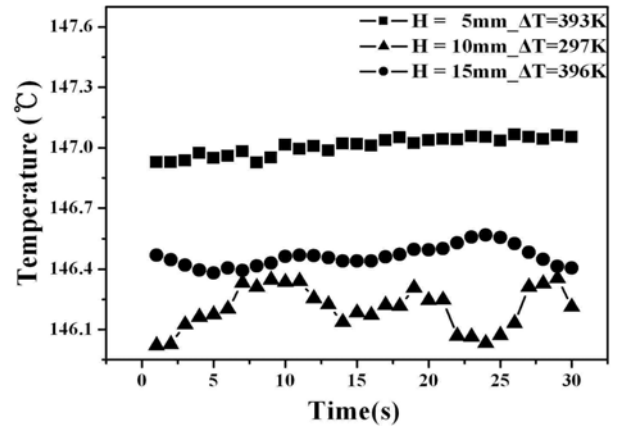


Fig. 8 Temperature fluctuation at unsteady state

동이 안정적이기하나 열 교환이 많이 이루어져 온도 편차가 크게 나타난다.

Fig. 8에서 보듯이 유동이 안정적인 경우 비정상 상태에서 측정된 온도 값은 유동 셀이 발생하는 경우에 비해 균일하게 측정된다.  $H = 5\text{mm}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 30초 동안 측정된 온도의 편차는  $0.14^\circ\text{C}$ 로  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 의  $0.33^\circ\text{C}$ 보다 균일하게 측정되었다. 그리고 정상상태에서 온도 편차가 제일 작았던  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 에서의 편차는  $0.18^\circ\text{C}$ 로  $H = 5\text{mm}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 와 큰 차이가 나지 않았다. 전체적으로 비정상 상태에서의 온도 편차는 정상 상태에서의 온도 편차에 비해 작았다.

## 4. 결 론

반도체 공정은 온도변화에 매우 민감하다. 수율이 향상되고 웨이퍼의 크기가 향상되면서 정밀한 온도분포를 요구하고 있다. 그러나 챔버 내의 온도차에 의해 자연대류가 발생하여 국소적으로 온도 편차가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 챔버 내 발생하는 유동의 모습을 가시화 하고, 챔버 높이 그리고 온도차를 변화시켜 핫플레이트 표면의 온도를 측정하였고, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 정상상태에서의 온도 편차는 유동 셀이 발생했을 때, 그러지 못한 경우보다 온도 편차가 적었다. 유동이 가장 안정한  $H = 5\text{mm}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때의 온도 편차  $0.75^\circ\text{C}$ 보다 작고 약한 셀이 여러 개 발생한  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 경

우에 0.44℃로 온도 편차가 제일 적게 나타났다. 이는 챔버내의 유동이 안정적일 경우 챔버의 상판과 열 교환이 많이 이루어져서 셀이 생긴 경우보다 온도 편차가 더 크게 나타나는 것이다.

(2) Rayleigh수가 낮은 경우 일수록 유동이 안정적이고, 셀이 발생하지 않았다. 유동이 안정적일 경우 비정상상태에서 균일하게 온도가 측정된다. 제일 안정적인  $H = 5\text{mm}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$ 일 때 온도편차는 0.14℃로 유동의 강도가 제일 강한  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 127^\circ\text{C}$ 경우의 0.33℃비해 약 0.2℃가 낮았다. 그러나 정상상태서 온도 편차가 가장 작은  $H = 15\text{mm}$ ,  $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ 경우 비정상상태의 온도 편차는 0.18℃로 유동 셀이 작고 약할 경우 온도 비정상상태서도 온도 불균일성에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

핫플레이트 챔버 설계 시 국소적인 온도차를 줄이기 위해 작고 약한 셀이 발생하도록 상판의 온도 및 챔버의 높이를 고려할 경우 더 좋은 온도 균일도를 얻을 수 있을 것이라고 판단된다.

the laminar natural convection in an air-filled square cavity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, pp. 1999~2008.

## 참고문헌

- (1) D.J. Tritton, 1988, *Physical fluid dynamics*, Oxford University press, New York, pp. 35~47.
- (2) Frank P. Incropera. and David P. DeWitt., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Edition, John Wiley & Sons, New York, pp 465~532.
- (3) Park, Y. H., 2003, "New Design Approach for the Uniform Temperature of Precision Hot Plate," *Trans. of the KSME(B)*., Vol. 27, No.11, pp. 1525~1533.
- (4) Lee, S. Y., Cho, H. H. and Lee, Y. W., 2000, "A study to improve temperature uniformity in hot plate oven for silicone wafer manufacturing," *Proceeding of KSME 2000 Fall Annular meeting(B)*, pp.261~266.
- (5) O. Manca. and S. Nardini., 2007, "Experimental investigation on natural convection in horizontal channels with the upper wall at uniform heat flux," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 pp. 1075~1086.
- (6)W. Wu, D. Ewing. and C.Y. Ching., 2006, "The effect of the top and bottom wall temperatures on