

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 14, No. 2: July 2018 pp. 41-47

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2018.14.2.041>

## 진공 환경에서 가열되는 반도체 웨이퍼로의 입자 침착에 관한 수치해석적 연구

박수빈<sup>1)</sup> · 유경훈<sup>1)\*</sup> · 이건형<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>한국생산기술연구원 나노오염제어연구실, <sup>2)</sup>삼성디스플레이 FT기술그룹  
(2018년 6월 22일 투고, 2018년 6월 28일 수정, 2018년 6월 29일 게재확정)

## A Numerical Study on Particle Deposition onto a Heated Semiconductor Wafer in Vacuum Environment

Su-Bin Park<sup>1)</sup> · Kyung-Hoon Yoo<sup>1)\*</sup> · Kun-Hyung Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Nanoscale Contamination Control Laboratory,*

*Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Ansan-si 15588, Korea*

<sup>2)</sup>*Facility Technology Group, SAMSUNG DISPLAY, Asan-si 31454, Korea*

(Received 22 June 2018; Revised 28 June 2018; Accepted 29 June 2018)

### Abstract

Numerical analysis was conducted to characterize particle deposition onto a heated horizontal semiconductor wafer in vacuum environment. In order to calculate the properties of gas surrounding the wafer, the gas was assumed to obey the ideal gas law. Particle transport mechanisms considered in the present study were convection, Brownian diffusion, gravitational settling and thermophoresis. Averaged particle deposition velocities on the upper surface of the wafer were calculated with respect to particle size, based on the numerical results from the particle concentration equation in the Eulerian frame of reference. The deposition velocities were obtained for system pressures of 1000 Pa~1 atm, wafer heating of 0~5 K and particle sizes of 2~10<sup>4</sup> nm. The present numerical results showed good agreement with the available experimental ones.

**Keywords:** Vacuum Environment, Horizontal Semiconductor Wafer, Ideal Gas, Thermophoresis, Particle Deposition velocity

---

\* Corresponding author.

Tel : +82-31-8040-6437

E-mail : khyoo@kitech.re.kr

### 1. 서론

반도체 웨이퍼 표면상에 침착된 입자들은 집적회로의 패턴 결함(pattern defect)을 유발시켜 제품 수율 및 품질, 신뢰성 저하의 주요한 원인이 되므로 입자오염(particle contamination) 문제는 마이크로·나노 전자산업에 있어 매우 중요하다. 반도체 제조공정이 비록 초청정 클린룸(super cleanroom)내에서 이루어진다 하더라도 입자오염 원인은 공정 자체, 장비 내부에도 존재한다고 보고되고 있다(Nakamae et al., 2000). 오염입자의 발생 원인으로는 오염된 공정가스 라인, 진공장비의 누설, 웨이퍼 로딩과정의 불량, 균일 기상 핵생성(homogeneous gas phase nucleation), 반응기 벽면의 박편(flake) 발생 등을 들 수 있다(Setyawan et al., 2002). 발생된 오염입자들은 대류(convection), 확산(diffusion), 중력침강(gravitational settling), 열영동(thermophoresis), 정전기(electrostatics) 등의 다양한 입자전달 기작(mechanism)을 통하여 공정중인 웨이퍼 영역으로 이동하게 되는데 이러한 오염입자들을 웨이퍼 표면이 아닌 다른 영역으로 이동하도록 제어하는 것이 반도체 웨이퍼 표면상에 형성된 박막이 고순도와 균일도를 유지하는 데 있어 매우 중요하다.

한편, 0.01~500 mbar (1 Pa~5×10<sup>4</sup> Pa)의 시스템 압력에서 이루어지는 화학증착(CVD) 공정 등과 같은 반도체 제조공정들은 대부분이 진공 챔버 내에서 이루어지고 있어 이러한 저압 환경(low pressure environment)에서의 입자 거동 및 침착 특성을 분석하는 것은 입자오염 제어 측면에서 필수적으로 요구된다. Yoo(2002)는 진공환경에서 수평으로 놓여 있는, 가열되지 않는 반도체 웨이퍼로의 입자침착에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 수치해석 결과로부터 가스속도가 일정한 상태에서 시스템 압력이 감소하면 입자크기영역 2 nm~10<sup>4</sup> nm에 대해 반도체 웨이퍼 상부표면으로의 입자침착속도가 크게 증가됨을 보여 주었다. 따라서, 입자오염 억제 대책의 관점에서 열영동력에 의한 입자침착 감소 효과를 분석하는 것은 가치가 있다고 판단된다.

본 연구에서는 진공환경에서 수평으로 놓여 있는 가열되는 반도체 웨이퍼 표면으로의 대류, 브라운확산(Brownian diffusion), 중력침강, 열영동력이 모두 고려되는 입자침착 특성에 대한 수치해석적 모사를

수행하였다. 참고로 본문중의 변수 및 상수, 물성치들은 모두 SI시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었다.

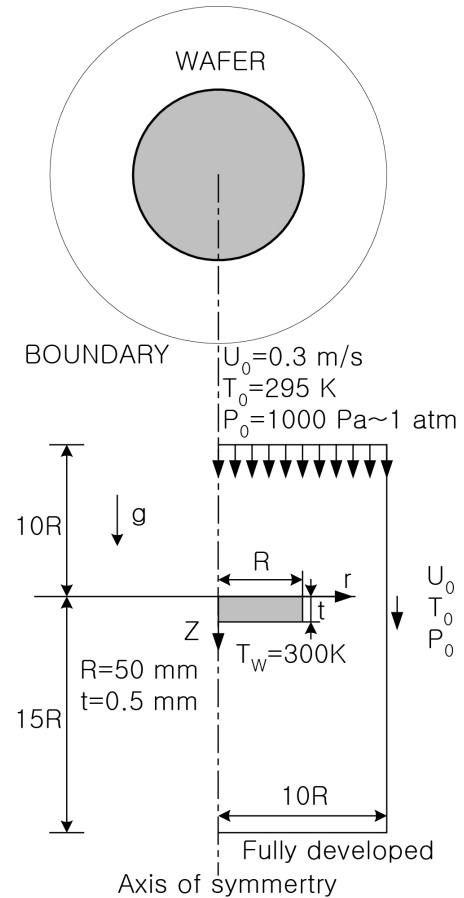


Fig. 1. Schematic diagram of the present calculation domain.

### 2. 수치해석 방법

#### 2.1 계산 영역 및 조건

본 연구에서 고려한 계산영역은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 수직형 단일 웨이퍼 반응기(reactor)의 반도체 웨이퍼 배치형상을 모사한 자유롭게 떠있는 수평 웨이퍼의 경우이다. 수평 웨이퍼의 상부표면으로부터 웨이퍼 반경 R의 10배만큼 떨어진 계산영역의 상부 유입구에서 온도 T<sub>0</sub>, 속도 U<sub>0</sub>로 유입되고

있는 가스 자유유동(free stream)에는 입자들이 부유되어 있고, 수평 웨이퍼는 주위 가스보다 높은  $T_w$ 의 온도로 가열되고 있다. 계산영역의 측면계면은 그곳에서의 유체 속도성분이 상부 유입유동의 조건, 즉  $u_z = U_0$ ,  $u_r = 0$ 을 회복할 수 있을 정도로 웨이퍼 반경의 10배만큼 충분히 멀리 위치되어 있다. 여기서  $u_z$ ,  $u_r$ 는 각각  $z$ ,  $r$  방향으로의 가스속도이다. 하부계면은 완전확립(fully developed) 조건이 달성되도록 웨이퍼 반경의 15배만큼 떨어져 있다.

본 연구에 고려된 가스 및 입자는 각각 공기와 PSL(PolyStyrene Latex)입자이다. 수평 웨이퍼의 직경  $2R$ 은 100 mm, 두께  $t$ 는 0.5 mm이다. 자유유동속도  $U_0$ 는 0.3 m/s이고, 자유유동온도  $T_0$ 는 295 K, 웨이퍼의 온도  $T_w$ 는 300 K로서 온도차  $\Delta T(=T_w - T_0)$ 는 5 K이다. 배경압력인 시스템 압력은 10 mbar (1000 Pa)에서 1 atm ( $1.013 \times 10^5$  Pa)의 범위가 고려되었다.

## 2.2 진공에서의 가스의 성질

본 연구에서 가스는 이상기체법칙을 따른다고 가정하였다. 진공환경에서의 가스의 밀도  $\rho$ 와 평균자유행로  $\lambda$ , 분자점성계수  $\mu$ , 열전도율  $k$ , 열확산계수  $\alpha$ 는 각각 다음의 공식으로 산출하였다(Roth, 1976).

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{MP_0}{RT_0} \quad \lambda = \frac{k_B T_0}{\sqrt{2} \pi d^2 P_0}, \\ \mu &= \frac{0.998 \sqrt{m k_B T_0}}{\pi^{3/2} d^2}, \quad k = \frac{9\gamma - 5}{4} \mu C_V, \\ \alpha &= \frac{k}{\rho C_P} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 가스의 분자량(kg/mol),  $R$ 은 기체상수(8.314 J/K·mol),  $d$ 는 가스 분자의 지름(m),  $m$ 은 가스 분자의 질량(kg),  $k_B$ 는 볼츠만상수( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K),  $P_0$ 는 시스템 압력(Pa),  $T_0$ 는 자유유동온도(K),  $k$ 는 가스의 열전도율,  $\gamma$ 는 가스의 비열비,  $C_V$ ,  $C_P$ 는 각각 가스의 정적 및 정압비열이다. 본 연구의 고려 대상 가스인 공기의 경우  $M=28.97 \times 10^{-3}$  kg/mol,  $d=3.72 \times 10^{-10}$  m,  $m=4.81 \times 10^{-26}$  kg,  $\gamma=\frac{7}{5}$ ,  $C_V=\frac{5R}{2M}$ ,  $C_P=\frac{7R}{2M}$ 이다.

본 연구의 진공환경에 대한 가스 유동장이 연속체 특성영역(continuum regime)인지를 검토하기 위하여 가장 낮은 시스템 압력인  $P_0=10$  mbar(1000 Pa)에 대한 유동 Knudsen 수  $Kn=\lambda/R$ 를 구해본 결과  $Kn=0.000132$  ( $\ll 1$ )가 얻어졌다. 따라서 본 연구의 진공환경에 대한 가스 유동장은 연속체 특성영역으로 간주되었다. 한편, 유동 Reynolds 수  $Re=\frac{2\rho U_0 R}{\mu}$ 는 자유유동속도가  $U_0=0.3$  m/s일 때 시스템압력 10 mbar에 대해 19, 1 atm에 대해 1900이 얻어졌다. 따라서, 가스 유동장은 층류(laminar flow)로 간주되었다.

## 2.3 지배방정식 및 수치계산방법

본 연구의 계산영역 및 주어진 진공조건에 대해 정상상태 비압축성 축대칭 층류 유동장과 온도장에 대한 다음의 지배방정식을 고려하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r u_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_r) &= -\frac{\partial p}{\partial r} \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \mu \frac{\partial u_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u_r}{\partial z}\right) - \frac{\mu u_r}{r^2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z u_z) &= -\frac{\partial p}{\partial z} \\ &+ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \mu \frac{\partial u_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r u_r T) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \alpha \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\alpha \frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (5)$$

여기서,  $u_r$ ,  $u_z$ 는 각각  $r$ ,  $z$  방향으로의 가스속도,  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 가스의 밀도,  $\mu$ 는 가스의 분자점성계수,  $\alpha$ 는 가스의 열확산계수이다. 수평 웨이퍼 표면에서의 유체 속도는 점착조건(no slip condition)으로 지정하였다.

한편, 본 연구의 진공환경에서의 가스유동장에 대한 입자의 Stokes 수  $Stk=\frac{\tau_p U_0}{R}$ 가 가장 클 것으로 판단되는  $10^4$  nm(10  $\mu$ m) 입자의 시스템 압력 10 mbar(1000 Pa)에 대해  $Stk=0.00547$  ( $\ll 1$ )이 얻어졌고 본 연구의 관심 입자크기영역 2 nm~ $10^4$  nm 전체에 걸쳐 유동장에 대한 입자의 관성력이 무시되었다. 따라서, 관성력을 무시한 희박 입자상에 대한 오일

러 관점에서의 축대칭 입자농도장의 지배방정식을 다음과 같이 고려하였다(Oh et al., 1996).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r^p c) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z^p c) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_B \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_B \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (6)$$

$$u_r^p = u_r - K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (7a)$$

$$u_z^p = u_z + \tau_p g - K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (7b)$$

여기서,  $u_r^p$ ,  $u_z^p$ 는 각각 r, z 방향으로의 입자속도,  $u_r$ ,  $u_z$ 는 각각 r, z 방향으로의 가스속도, c는 입자농도,  $D_B$ 는 입자의 브라운확산계수,  $\tau_p$ 는 입자이완시간, g는 중력가속도,  $\nu$ 는 가스의 동점성계수, K는 열영동계수이고 다음과 같이 표현된다.

$$K = \frac{2.294(k_{air}/k_p + 2.2Kn)C_S}{(1 + 3.438Kn)(1 + 2k_{air}/k_p + 4.4Kn)} \quad (8)$$

여기서,  $k_{air}$ 는 공기의 열전도율로서 식 (1)의 k가 사용되며,  $k_p$ 는 입자의 열전도율, Kn은 입자의 Knudsen 수로서  $\frac{2\lambda}{d_p}$ 이며,  $d_p$ 는 입자크기,  $\lambda$ 는 평균 자유행로로서 식 (1)이 사용된다. 또,  $C_S$ 는 미끄럼보정인수로서 다음과 같이 표현된다.

$$C_S = 1 + Kn \left( 1.257 + 0.4 \exp\left(-\frac{1.1}{Kn}\right) \right) \quad (9)$$

식 (8)로부터 시스템 압력이 변함에 따라 Kn,  $C_S$ 가 변하므로 열영동계수 K도 변하게 됨을 알 수 있다. 수평 웨이퍼 벽면에서의 입자농도는 차단(interception)효과를 고려하여 입자의 반경위치에서  $c=0$ 을 지정하였다.

전술한 지배방정식 (2)~(7)의 유한체적법(FVM)에 의한 차분화에 있어 유체의 압력구배항은 Patankar(1980)의 SIMPLE 알고리즘으로 해결하고 유체와 입자의 대류항들은 Power law scheme을 사용하여 처리하였으나, 입자농도장 지배방정식 (6)을 계산할 때 입자의 속도장이 연속법칙을 만족하지 않으므로 Stratmann and Whitby(1989)가 지적한대로 Patankar의

알고리즘을 보정하였다. 계산격자계는 Fig. 2와 같이 Song et al.(2009)의 웨이퍼 직경 100 mm의 경우와 동일한 180(axial)×110(radial)으로 구성된 엇물림 격자계(staggered grid system)이며, 이때 수평 웨이퍼 표면과 바로 이웃격자와의 간격을 5 μm로 설정하였고 이로부터 약 1.2의 공비를 유지시키면서 등비수열적으로 증가되도록 계산격자들을 배치하였다.

수렴조건은 유동장의 경우 질량 및 속도의 정규화된 잔류소스들의 합이  $1 \times 10^{-3}$  이하일 때, 온도장과 농도장의 경우 각 격자점에서의 이전값 및 신규값의 차이를 이전값으로 나눈 값이 모두  $1 \times 10^{-4}$  이하일 때로 하였다. 계산격자 테스트 결과, 상기의 180(axial)×110(radial)의 경우와 두 방향으로 각각 10개씩 충분한 경우에 대해 서로 동일한 계산결과가 얻어졌다. 또한, 각 경계면들의 위치를 2R씩 충분한 경우도 Fig. 1의 계산영역에 대한 경우와 동일한 계산결과가 얻어짐을 확인하였다. 희박 입자상(dilute particle phase)에 기인한 일방향성(one way coupling)에 근거하여 가스의 유동장 및 온도장의 수렴된 결과를 입자 농도장에 대입하여 각각의 입자크기에 대한 반도체 웨이퍼 상부표면으로의 입자침착속도를 구하였다. 수치해석방법은 대기압 환경에 놓인 수평 웨이퍼의 경우인 Yoo et al.(1995)과 진공 환경에 놓인 비가열 수평 웨이퍼의 경우인 Yoo(2002)의 수치해석방법과 근본적으로 동일하므로 관련 내용들을 참조할 수 있다.

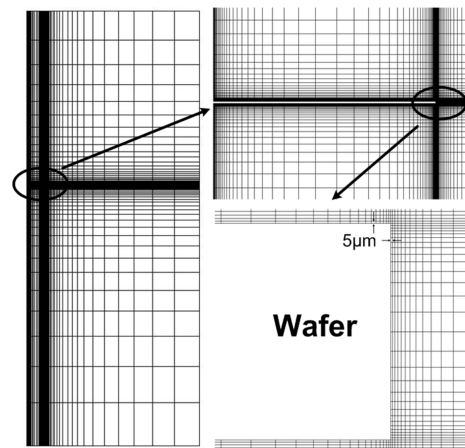


Fig. 2. Grid structure for the present numerical calculation.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 평균 입자침착속도

Fig. 3은 대기압(1 atm) 또는 저압(1000 Pa) 환경에서 입자크기에 따른 수평 웨이퍼 상부표면상의 평균 입자침착속도의 변화를 보여주고 있다. 이때, 가스유동은 시스템 압력이 변하더라도 일정한 질량유량으로 공급되는 경우가 고려되고 있다. 그림으로부터  $\Delta T=0$  K인 웨이퍼가 가열되지 않는 경우, 2 nm에서  $10^4$  nm의 입자크기영역 전체에 걸쳐 대기압과 저압의 경우 모두 'V'형 입자침착속도 특성곡선을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그리고 시스템 압력이 대기압에서 저압으로 감소하면 입자침착속도가 증가되고 있음을 알 수 있다. 이전 연구(Yoo, 2002)에서는 가스 속도를 일정하게 유지한 상태에서 시스템 압력이 감소하는 경우를 고려하였는데 마찬가지로 입자침착속도가 증가하는 것을 보여주었다. 이는 이전 연구(Yoo, 2002)에서 언급한 것처럼 가스 속도가 일정한 상태에서 시스템 압력이 감소하면 입자에 대한 가스의 저항력인 스톱스 점성항력(Stokes drag)의 감소에 따른 입자의 기계적 유동률(mechanical mobility)의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

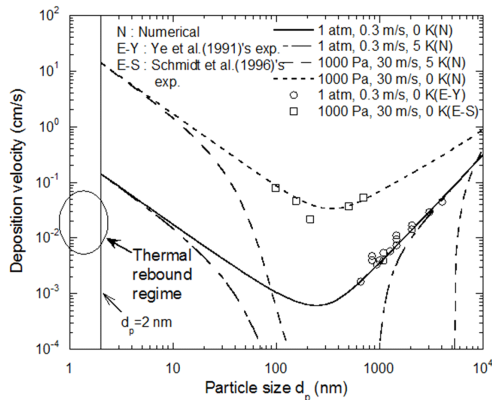


Fig. 3. Variations of averaged particle deposition velocities on the upper surface of wafer with respect to particle size ( $T_0=295$  K).

가스 유량이 일정하고 웨이퍼가 유입가스 온도보다  $\Delta T=5$  K만큼 가열되는 경우, 저압인 1000 Pa 및

대기압에서 모두 입자침착속도가 감소되지만 저압의 경우가 대기압의 경우보다 더 크게 감소하고 있음을 알 수 있다. 특히 저압인 1000 Pa의 경우, 100 nm보다 큰 입자크기영역에서 크게 감소되고 있어 이 입자크기영역에서 진공환경하의 열영동력에 의한 입자침착 억제효과가 높음을 알 수 있다. 이는 식 (1)과 식 (6), 식 (7)의 검토로부터 입자의 열영동속도는 압력의 제곱에 반비례하는 반면에 브라운 확산속도와 중력침강속도는 압력에 반비례하기 때문에 시스템 압력이 감소할 때 상대적으로 열영동속도가 더 크게 증가한 것에 기인한 것이다.

한편, 그림에는 실험과의 비교를 위하여 현재 구할 수 있는 100 nm보다 큰 입자크기 영역에서의 저압 1000 Pa에서의 Schmidt et al.(1996)의 실험결과와 대기압하의 Ye et al.(1991)의 실험결과가 함께 도시되어 있는데 비교적 계산결과들과 잘 일치하고 있음을 알 수 있어 수치해석 결과가 그 입자크기 영역에서는 타당함을 알 수 있다. 추가로, 그림에 도시된 2 nm 이하의 열적 리바운드 특성영역(thermal rebound regime)을 고려하지 않은 것은 이 특성영역에서는 입자의 부착확률(sticking probability)이 1보다 작기 때문에(Ichitsubo et al., 1996) 본 연구의 웨이퍼 표면의 경계조건인  $c=0$ 의 가정이 성립되지 않기 때문이다.

#### 3.2 국소 입자침착속도

Fig. 4는 시스템 압력이 1000 Pa의 저압일 때 비가열( $\Delta T=0$  K) 및 가열( $\Delta T=5$  K) 웨이퍼에 대한 입자크기별 웨이퍼 상부표면상의 국소 입자침착속도 분포를 보여주고 있다. 그림으로부터 입자크기가 5 nm인 경우 웨이퍼가 가열되더라도 입자침착속도들이 크게 감소되지 않고 있어 열영동력에 의한 입자 침착 감소 효과가 미미함을 알 수 있다. 또한, 입자크기가 5 nm인 경우 웨이퍼의 중심부에서 가장자리로 갈수록 입자침착속도가 증가하고 있어 경계층의 영향을 받는 확산이 입자침착을 지배함을 알 수 있다.

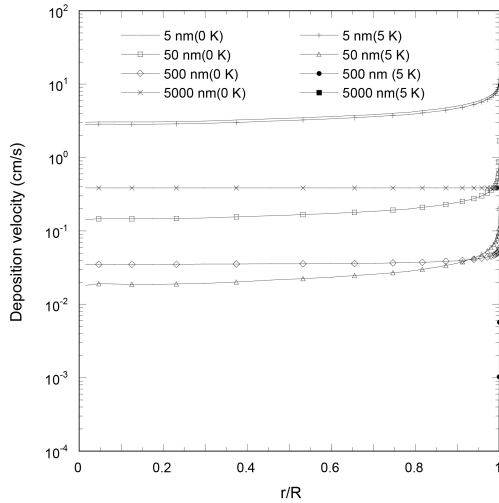


Fig. 4. Variations of local particle deposition velocities on the upper surface of wafer with respect to particle size ( $P_0=1000$  Pa,  $U_0=30$  m/s,  $T_0=295$  K).

입자크기가 50 nm가 되면 입자침착속도의 크기가 웨이퍼의 가열에 의해 1 오더(order) 수준으로 감소하게 되고 500 nm와 5000 nm가 되면 입자침착속도가  $r/R=1$ 인 모서리 부분을 제외한 모든 부분에서 그 그래프 상의 y축의 입자크기속도 범위에 표시되지 않을 정도로 급격하게 감소하게 됨을 알 수 있다. 특히, 입자크기가 5000 nm인 경우 웨이퍼가 가열되지 않으면 웨이퍼상의 위치에 관계없이 입자침착속도가 일정하여 중력침강이 입자침착을 지배하고 있지만 웨이퍼가 가열되면 열영동력에 의해 모든 입자크기속도가 표시되지 않을 정도로 입자침착이 상당히 감소되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 대기압에서는 웨이퍼가  $\Delta T=5$  K만큼 가열되더라도 입자크기 5000 nm의 경우 중력침강이 열영동력보다 지배적이지만(Yoo et al., 1995), 식 (1)과 식 (7b)를 검토해 보면 입자의 열영동속도는 압력의 제곱에 반비례하는 반면에 중력침강속도는 압력에 반비례하기 때문에 시스템 압력이 감소할 때 상대적으로 열영동속도가 중력침강속도보다 더 크게 증가한 것에 기인한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

1000 Pa~1 atm, 295 K의 진공환경에서 수평으로 놓여져 있는 가열되는 반도체 웨이퍼로의 2 nm ~  $10^4$  nm의 입자크기범위에 대한 입자침착 특성을 수치해석을 통하여 고찰하고 계산된 결과들로부터 다음과 같은 사항들을 관찰할 수 있었다.

(1) 본 연구의 입자침착속도에 대한 수치해석 결과는 100 nm보다 큰 입자크기영역에 대한 기존의 실험결과와 비교적 잘 일치하여 타당한 결과를 제시함을 확인하였다.

(2) 가스 유량이 일정할 때 웨이퍼가 주위가스보다 5 K만큼 가열되면 저압인 1000 Pa 및 대기압에서 모두 입자침착속도가 감소되지만 저압의 경우가 대기압보다 더 크게 감소하여 진공환경에서의 열영동력에 의한 입자침착 억제효과가 더 높음을 알 수 있었다.

(3) 1000 Pa의 저압에서 웨이퍼가 주위가스보다 5 K만큼 가열되면 입자크기가 5 nm인 경우는 입자침착에 있어 여전히 확산이 지배적이지만 50 nm 이상인 경우는 열영동력이 지배적임을 관찰할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 기획재정부가 주관하고 한국생산기술연구원 이 지원한 기업주문형 생산기술실용화사업 “첨단 전자산업 클린룸을 위한 듀얼프리쿨링 방식의 냉원 시스템 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

Ichitsubo, H., Hashimoto, T., Alonso, M., and Kousaka, Y. (1996). Penetration of ultrafine particles and ion clusters through wire screens, *Aerosol Science and Technology*, 24, 119-127.

Nakamae, K., Ohmori, H., and Fujioka, H. (2000). A simple VLSI spherical particle-induced fault simulator: application to DRAM production process, *Microelectronics Reliability*, 40, 245-253.

- Oh, M.D., Yoo, K.H., and Myong, H.K. (1996). Numerical analysis of particle deposition onto horizontal free-standing wafer surfaces heated or cooled, *Aerosol Science and Technology*, 25, 141-156.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*, New York, McGraw Hill.
- Roth, A. (1976). *Vacuum technology*, New York, North-Holland Publishing.
- Schmidt, F., Fissan, H., and Schmidt, K.G. (1996). Transport of submicron particles from a leak to a perpendicular surface in a chamber at reduced pressure, *Journal of Aerosol Science*, 27, 547-557.
- Setyawan, H., Shimada, M., Ohtsuka, O., and Okuyama, K. (2002). Visualization and numerical simulation of fine particle transport in a low-pressure parallel plate chemical vapor deposition reactor, *Chemical Engineering Science*, 57, 497-506.
- Song, G.S., Yoo, K.H., and Lee, K.H. (2009). Particle deposition on a semiconductor wafer larger than 100 mm with electrostatic effect, *Particle and Aerosol Research*, 5(1), 17-27.
- Stratmann, F., and Whitby, E.R. (1989). Numerical solution of aerosol dynamics for simultaneous convection, diffusion and external forces, *Journal Aerosol Science*, 20, 437-440.
- Ye, Y., Pui, D.Y.H., Liu, B.Y.H., Opiolka, S., Blumhorst, S., and Fissan, H. (1991). Thermophoretic effect of particle deposition on a free standing semiconductor wafer in a clean room, *Journal Aerosol Science*, 22, 63-72.
- Yoo, K.H. (2002). Analysis on Particle Deposition onto a Horizontal Semiconductor Wafer at Vacuum Environment, *Transactions of the KSME (B)*, 26(12), 1715-1721.
- Yoo, K.H., Oh, M.D., and Myong, H.K. (1995). Analysis of particle deposition onto a heated or cooled, horizontal free-standing wafer surface, *Transactions of the KSME*, 19(5), 1319-1332.