

## 정전효과가 있는 100 mm보다 큰 반도체 웨이퍼로의 입자침착

송 근 수 · 유 경 훈\* · 이 건 형<sup>1)</sup>

한국생산기술연구원 에어로졸·오염제어연구실, <sup>1)</sup>삼성전자(주) 반도체총괄 생산기술팀  
( 접수, 채택 )

### Particle deposition on a semiconductor wafer larger than 100 mm with electrostatic effect

Gen-Soo Song, Kyung-Hoon Yoo\* and Kun-Hyung Lee<sup>1)</sup>

*Aerosol and Contamination Control Laboratory,  
Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)*

<sup>1)</sup>*Manufacturing Technology Team, Semiconductor Business, Samsung Electronics*

(Received , accepted )

#### Abstract

Particle deposition on a semiconductor wafer larger than 100 mm was studied experimentally and numerically. Particularly the electrostatic effect on particle deposition velocity was investigated. The experimental apparatus consisted of a particle generation system, a particle deposition chamber and a wafer surface scanner. Experimental data of particle deposition velocity were obtained for a semiconductor wafer of 200 mm diameter with the applied voltage of 5,000 V and PSL particles of the sizes between 83 and 495 nm. The experimental data of particle deposition velocity were compared with the present numerical results and the existing experimental data for a 100 mm wafer by Ye *et al.* (1991) and Opiolka *et al.* (1994). The present numerical method took into consideration the particle transport mechanisms of convection, Brownian diffusion, gravitational settling and electrostatic attraction in an Eulerian frame of reference. Based on the comparison of the present experimental and numerical results with the existing experimental results the present experimental method for a 200 mm semiconductor wafer was found to be able to present reasonable data.

**Key words :** Semiconductor wafer, 200 mm wafer diameter, Electrostatic effect, Experimental method, Particle deposition velocity

#### 1. 서 론

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)31-8040-6437, E-mail : khyoo@kitech.re.kr

반도체 디바이스의 집적도가 증가하고 회로 선폭

이 감소함에 따라 미세입자 오염에 의한 디바이스의 패턴 결함 및 전기적 특성불량 문제가 심각해진다. 현재 양산되고 있는 VLSI의 최소 회로선폭을 50~60 nm로 볼 때, 세계반도체기술로드맵 ITRS (2007)에서 제시하는 제어대상 입자 크기 (critical particle size)가 최소 회로선폭의 1/2이라는 점을 고려해 보면 제어 입자크기가 25~30 nm가 되어야 한다. 또한, 2000년을 시작으로 생산 웨이퍼의 직경이 200 mm (8 인치)에서 300 mm (12 인치)로 변경되고 있으며 이는 300 mm 웨이퍼가 기존 사이즈의 웨이퍼 대비 칩당 생산원가를 절감할 수 있음을 의미한다. ITRS (2007)에 의하면 이러한 경제 논리에 입각하여 2012년에는 직경 450 mm의 웨이퍼와 32 nm의 공정이 사용될 것으로 예상되고 있으며 이는 조만간 16 nm 크기 수준의 초미세 오염물질까지 직접적으로 제어해야만 하는 기술적으로 극한의 초대구경 웨이퍼 공정시대가 도래하게 됨을 시사하고 있다.

반도체 웨이퍼 표면으로의 입자침착에 관한 연구는 Hayakawa *et al.* (1986)의 실험적 연구와 Liu and Ahn (1987)의 수치해석적 연구를 시작으로 중력침강, 대류, 확산, 열영동, 정전기, 난류, 회전유동 등의 다양한 입자수송 메커니즘이 반도체 웨이퍼 표면으로의 입자침착에 미치는 영향을 고찰하였다. 이러한 고찰로부터 웨이퍼 표면으로의 입자전달을 제어해서 입자침착을 억제시키려는 연구가 진행되었다 (Ye *et al.*, 1991; Bae *et al.*, 1994; Opiolka *et al.*, 1994; Oh *et al.*, 1996; Chein and Su, 2004; Yoo and Oh, 2005). 그러나 전술한 연구들은 모두 100 mm (4 인치) 이하의 직경을 가진 반도체 웨이퍼로의 입자침착 연구에 국한되고 있어 초대구경의 반도체 웨이퍼 생산시대가 도래하고 있는 시점에서 100 mm보다 큰 반도체 웨이퍼 표면으로의 입자침착에 대한 연구가 아직까지 전무한 실정에 있다. 이러한 연구 결핍은 실험적 검증을 위한 클린룸 시설 및 고가의 장비, 웨이퍼 및 PSL입자 등의 과도한 연구비용이 요구되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 제어대상 입자의 크기가 나노 영역으로 진입함에 따라 정전효과에 의한 입자침착 연구가 더욱 필요하게 된다. 특히 대구경 웨이퍼를 사용하는 생산 공정에서는 정전기에 의한 입자 부착의 영향성이 더욱 우려되며 FOUP (Front Open Unified Pod)이나 EFEM (Equipment Front End Module) 내의 환경 조건이 매우 중요하게 된다. 또한 플라즈마 진공을

사용하는 대구경 웨이퍼 공정장비에서는 프로세스 챔버 내에서 웨이퍼를 고정하기 위하여 정전기를 이용한 정전척 (electrostatic chuck)를 사용하고 있어 하전된 웨이퍼 주위의 강한 전기장과 나노입자의 높은 전기적 유동율에 의한 입자침착의 대폭적인 증가가 예상된다.

본 연구에서는 직경 100 mm보다 큰 반도체 웨이퍼로의 입자침착 특성을 고찰하기 위하여 클린룸 환경에서 정전효과가 있는 직경 200 mm의 수평 반도체 웨이퍼 상부표면으로의 입자침착속도를 실험과 수치해석을 통하여 관찰하였다. 실험적 연구에서는 지름이 각각 83, 100, 150, 200, 300, 495 nm인 PSL입자에 대해 5,000 V의 전압이 인가된 직경 200 mm의 수평 반도체 웨이퍼 상부 표면으로의 입자침착 실험을 수행하고 평균 입자침착속도를 구하였다. 수치해석적 연구에서는 직경 200 mm 웨이퍼의 입자침착속도 실험결과와의 비교뿐만 아니라 직경 300 mm 웨이퍼의 입자침착 특성을 고찰하기 위하여 직경이 각각 100, 200, 300 mm인 반도체 웨이퍼 상부표면으로의 입자침착속도를 대류, 브라운확산, 중력침강, 정전기력을 고려하여 산출하였다. 참고로 본문중의 변수 및 상수, 물성치는 특별한 언급이 없으면 모두 SI 시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었다.

## 2. 실험 및 방법

반도체 웨이퍼 입자침착 실험은 크기가 100 nm 이상인 입자가 공기 1 m<sup>3</sup>의 체적 내에 100개 미만인 ISO class 2의 초청정 클린룸에서 수행되었다. 그림 1은 본 연구에 사용된 웨이퍼 입자침착 실험장치를 도시하고 있다. 본 실험장치는 입자발생부와 웨이퍼가 클린룸 공기에 노출되는 것을 묘사할 수 있는 밀폐된 챔버를 가지고 있는 입자부착부로 구성되어 있다 (MSP 2300, USA).

### 2.1 입자발생부

실험에 사용된 입자는 단분산 (monodisperse)의 PSL (PolyStyrene Latex)이다. PSL입자를 비저항이 18.0 M $\Omega$ ·cm보다 큰 초순수와 혼합시킨 PSL입자 수용액을 아토마이저 (atomizer)에 넣고 청정공기 (clean dry air)를 압축공급하면 아토마이저에서 거품

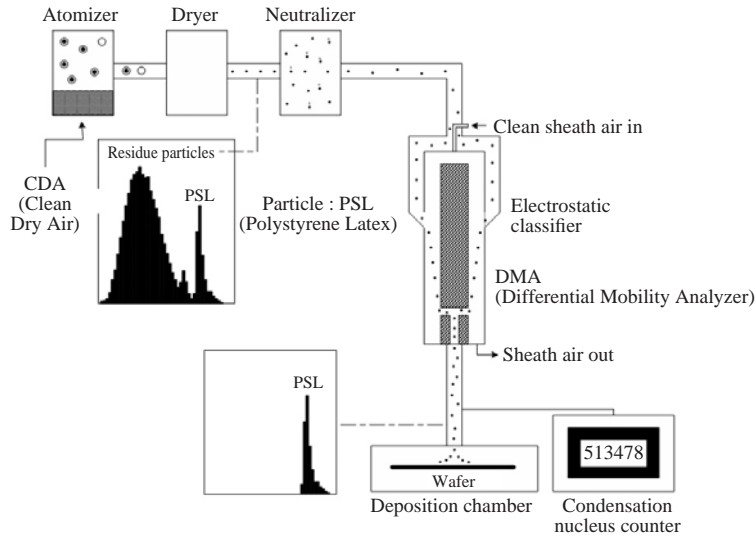


Figure 1. Schematic diagram of the present experimental apparatus for particle generation and deposition.

(bubble)이 발생하면서 PSL입자가 발생된다. 발생한 입자들은 무정전 튜브를 따라 흐르면서 건조기 (dryer), 전기중화기 (neutralizer)를 차례로 지난 후에 DMA (Differential Mobility Analyzer)로 공급된다. 건조기는 입자 표면의 수분을 제거시키고 전기중화기는 입자들이 이극성 (bipolar) 평형전하분포를 가지도록 만든다. 정전분류기 (electrostatic classifier)인 DMA는 이극성 전하분포를 가지는 유입 입자들중에서 -1가의 전하를 지닌 PSL입자를 분리시켜 침착 챔버 (deposition chamber)로 보내고 나머지 입자들은 보호 공기 (sheath air)와 함께 출구로 배출된다. 침착챔버로 보내어진 -1가의 입자들은 2개의 갈래로 나누어진다. 하나는 입자계수기 (Condensation Nucleus Counter)로 향하여 유입 입자농도 계측에 사용되며 나머지는 입자부착부인 침착챔버로 투입된다.

### 2. 2 입자부착부

입자발생부로부터 침착챔버로 이동된 입자들은 그림 2에 도시된 샤워헤드 (shower head)를 통해 침착 챔버의 대기압 공간에 투입되어 수평으로 놓여진 웨이퍼의 상부표면에 침착된다. 샤워헤드는 지름이 0.3 mm인 126개의 구멍을 가지고 있고 입자들은 이 구멍을 통하여 침착챔버로 공급된다. 이때 웨이퍼 스테이지의 중심으로부터 상단 2 cm에서의 공기속도는 0.3 m/s로 측정되었다. 본 실험에 사용된 웨이퍼 직경

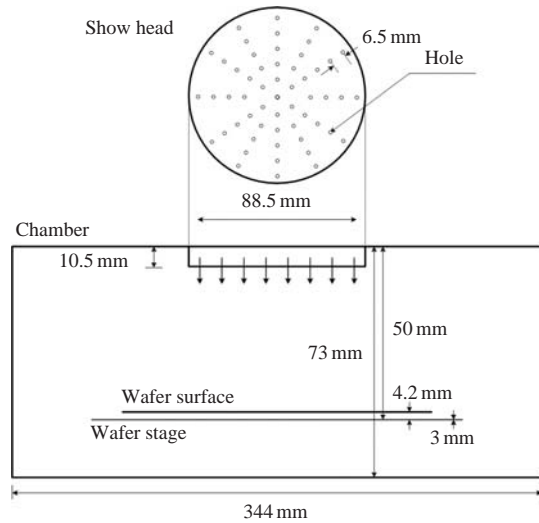


Figure 2. Schematic diagram of the present particle deposition chamber.

은 200 mm (8 인치)이며 웨이퍼는 웨이퍼 스테이지 상단에 놓인다. 스테이지는 0~5,000 V의 전압을 인가할 수 있도록 구성되었다.

### 2. 3 웨이퍼표면 스캐너 (Wafer surface scanner)

반도체 웨이퍼 표면으로의 입자침착속도를 구하는

실험적 연구를 위해서는 웨이퍼 표면상에 침착된 입자들을 계측하는 기술이 필수적으로 요구된다. Ye *et al.* (1991)과 Bae *et al.* (1993)은 처음으로 웨이퍼표면 스캐너를 사용하여 이전 연구들(Hayakawa *et al.*, 1986; Otani *et al.*, 1989; Pui *et al.*, 1990)의 단점인 과다한 웨이퍼 노출시간을 1/10 수준 이하로 감소시켰고 이를 통하여 이전 연구들의 일부 실험에서 관찰되었던 아토마이저로부터 발생된 PSL입자의 시간 경과에 따른 농도감소 문제를 최소화하였다. 한편, 웨이퍼표면 스캐너는 그동안 최소 측정 입자크기가 직경 100 mm의 반도체 웨이퍼에 대해 200 nm 정도였으나 광학기술의 발달로 인해 최근에는 직경 200 mm 웨이퍼에 대해 65 nm까지 확장되었다. 본 연구에서는 웨이퍼표면 스캐너로 KLA-Tencor SP1을 사용하여 직경 200 mm 웨이퍼에 대해 PSL입자의 지름 83 nm까지 입자계측을 수행하였다.

**2. 4 입자침착속도  
(Particle deposition velocity)**

입자침착속도는 입자의 침착특성을 표현하는 중요 물리량이다. 입자침착 실험결과로부터 입자침착속도  $v_d$ 는 다음과 같이 구하였다.

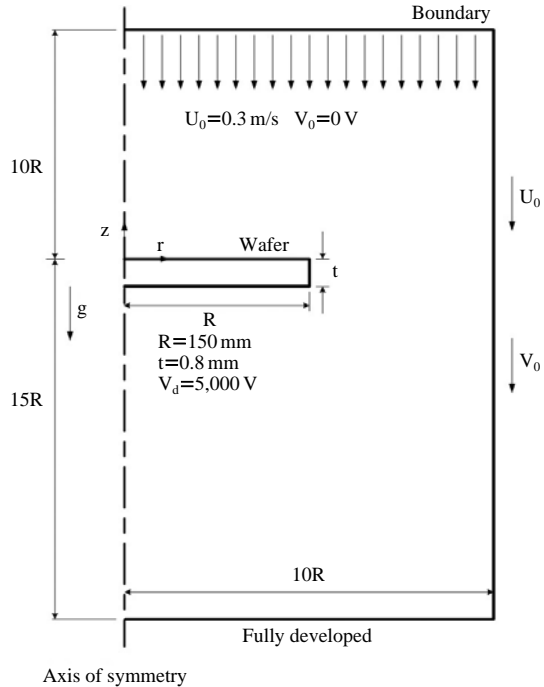
$$v_d = \frac{N_w}{c_0 A_w t} \tag{1}$$

여기서  $c_0$ 는 웨이퍼 상부표면 근처의 입자농도 [particles/m<sup>3</sup>],  $N_w$ 는 웨이퍼 표면상의 침착입자수 [particles],  $A_w$ 는 웨이퍼 면적 [m<sup>2</sup>],  $t$ 는 입자 침착시간 [s]이다. 웨이퍼 표면상의 침착입자수  $N_w$ 는 웨이퍼표면 스캐너를 이용하여 웨이퍼 입자침착 전과 후의 입자수의 차이를 이용하여 구하였다. 또한, 웨이퍼의 가장자리 효과(edge effect)를 제거하기 위하여 직경 200 mm 웨이퍼에 대해 7.5 mm의 가장자리 둘레를 제외시켰다(Ye *et al.*, 1991).

**3. 수치해석 방법**

**3. 1 계산영역 및 지배방정식**

그림 3은 본 수치해석적 연구에서 고려한 계산영역을 도시하고 있다. 웨이퍼의 상부표면으로부터 웨이퍼 반경  $R$ 의 10배만큼 떨어진 상부 유입구에서 속



**Figure 3.** Schematic diagram of the present calculation domain.

도  $U_0$ , 온도  $T_0$ 를 가진 자유공기유동이 유입되고 있다. 자유공기유동에는 -1가로 하전된 PSL입자들이 부유되어 있고 웨이퍼는 양의 전압  $V_d$ 로 인가되어 있다. 계산영역의 측면경계면은 그곳에서의 측방향 속도성분이 유입속도  $U_0$ 와 같도록 웨이퍼 반경의 10배만큼 충분히 멀리 위치되어 있고 하부경계면은 완전확립 (fully developed) 조건이 달성되도록 웨이퍼 반경의 15배만큼 충분히 떨어져 있다. 본 연구에서의 웨이퍼의 최대 직경 300 mm와 자유유동속도 0.3 m/s

에 대해 유동 레이놀즈수는  $Re = \frac{2\rho U_0 R}{\mu} = 5967$ 로 얻

어진다. 여기서,  $\rho$ 는 공기의 밀도 (1.2 kg/m<sup>3</sup>),  $U_0$ 는 자유유동속도,  $R$ 은 웨이퍼 반경,  $\mu$ 는 공기의 분자점성 계수 (1.81 × 10<sup>-5</sup> kg/m · s)이다. 이는 웨이퍼 상부표면상의 속도경계층을 평판을 지나는 수평 유동경계층으로 대략 간주한다면 난류로의 천이가 보통 발생하는 임계 레이놀즈수 10<sup>5</sup> ~ 2 × 10<sup>6</sup>보다는 매우 작은 것이다. 따라서 유체 유동장은 층류로 가정되었다. 이러한 고찰로부터 본 계산영역에 대해 정상상태 비압

축성 축대칭 층류 유동장에 대한 다음의 지배방정식들을 고려하였다.

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho u_r u_r) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_r) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) - \frac{\mu u_r}{r^2}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho u_r u_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho u_z u_z) =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)$$

여기서,  $u_r$ ,  $u_z$ 는 각각  $r$ ,  $z$  방향으로의 유체속도,  $p$ 는 압력,  $T$ 는 온도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\mu$ 는 유체의 분자점성계수이다.

한편, 본 연구의 원판 유동에 대한 Stokes 수  $Stk = \frac{\tau_p U_0}{2R}$ 가 가장 클 것으로 판단되는 10 $\mu$ m PSL 입자와

자유유동속도 0.3 m/s의 경우  $Stk = 3.28 \times 10^{-4} (\ll 1)$ 가 얻어지므로 본 연구의 고려대상 입자크기영역 10~10<sup>4</sup> nm 전체에 걸쳐 유체 유동장에 대한 입자의 관성력이 무시되었다. 따라서, 관성력을 무시한 희박 입자상 (dilute particle phase)에 대한 오일러 관점에서 축대칭 입자농도장의 지배방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r^p c) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z^p c) =$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D_B \frac{\partial c}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_B \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

$$u_r^p = u_r + B(F_e)_r, \quad u_z^p = u_z - \tau_p g + B(F_e)_z \quad (6)$$

여기서,  $u_r$ ,  $u_z$ ,  $u_r^p$ ,  $u_z^p$ 는 각각  $r$ ,  $z$  방향으로의 유체속도와 입자속도,  $c$ 는 입자농도,  $D_B$ 는 입자의 브라운확산계수,  $\tau_p$ 는 입자이완시간,  $g$ 는 중력가속도,  $B$ 는 입자의 기계적 유동율,  $F_e$ 는 입자에 작용하는 정전기력이

다.

정전기력은 다음과 같이 쿨롱력 (Coulomb force)을 고려하였다.

$$(F_e)_r = q_p E_r, \quad (F_e)_z = q_p E_z, \quad q_p = -e \quad (7)$$

여기서  $q_p$ 는 입자전하,  $E_r$ ,  $E_z$ 는 각각  $r$ ,  $z$  방향의 국소 전기장성분,  $e$ 는 기본전하 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)이다. 식 (7)은 본 연구의 실험에 사용하는 -1가로 하전된 입자의 경우를 나타내며 웨이퍼에 양의 전압이 인가되면 입자와 웨이퍼 간에 정전인력이 작용하게 된다. 웨이퍼 주위의 국소 전기장성분을 구하기 위하여 웨이퍼는 인가전압  $V_d$ 로 균일하게 유지된다고 가정되었고 계산영역에 걸쳐 다음의 라플라스 (Laplace) 방정식이 고려되었다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

$$E_r = -\frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad E_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (9)$$

여기서  $\Phi$ 는 전위 (electric potential)이다.

### 3. 2 계산조건 및 방법

해석에 고려된 유체 및 입자는 각각 공기와 PSL 입자이다. 반도체 웨이퍼의 반경  $R$ 과 두께  $t$ 는 직경 100 mm 웨이퍼의 경우 50 mm와 0.5 mm이고 직경 200 mm 웨이퍼의 경우 100 mm와 0.7 mm, 직경 300 mm 웨이퍼의 경우 150 mm와 0.8 mm이다. 자유유동속도  $U_0$ 는 0.3 m/s, 자유유동온도는 293 K, 웨이퍼의 인가전압  $V_d$ 는 0~5,000 V가 고려되었다. 웨이퍼 표면에 도달한 입자들은 튕김 (bounce) 없이 모두 침착된다고 가정하면 차단 (interception) 효과를 고려하여 웨이퍼 표면으로부터 입자의 반경위치에서 입자농도  $c=0$ 을 지정하였다. 계산영역의 각 외부 경계면에서의 입자농도와 전위는 자유유동의 입자농도  $c=c_0$ ,  $\Phi=0$  V를 지정하였다. 이외의 경계조건들은 그림 2에 도시하였다.

전술한 지배방정식 (2)~(9)에 대해 유한체적법 (finite volume method)에 의한 차분화를 실시하였다. 이때 유체의 압력구배항은 SIMPLE 알고리즘으로 해결하고 유체와 입자의 대류항은 상류차분도식 (up-

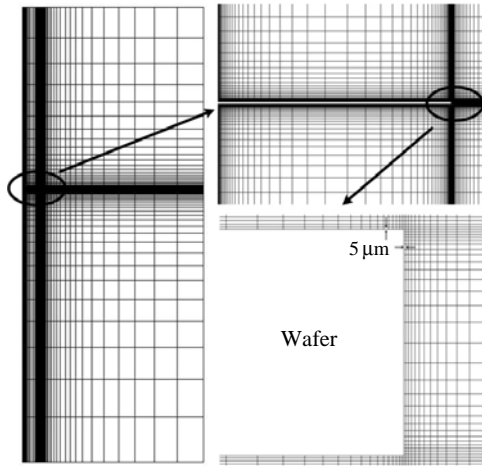


Figure 4. Grid structure for the present numerical calculation.

wind scheme)을 사용하여 처리하였으나, 입자농도장을 계산하는 데 있어 입자의 속도장이 연속법칙을 만족하지 않으므로 Stratmann and Whitby (1989)가 지적한대로 Patankar의 알고리즘을 보정하였다. 계산 격자계는 그림 4와 같이 154(axial) × 136(radial)으로 구성된 비엇물림격자계(non-staggered grid system)를 사용하였다. 웨이퍼 표면과 바로 이웃격자와의 간격은 유경훈 등(1995)의 연구에 근거하여 5 μm으로 설정하였고 이로부터 약 1.2의 공비를 유지하면서 등비수열적으로 증가되도록 격자들을 배치하였다.

수렴조건은 유동장의 경우 정규화된 질량 및 운동량의 잔류소스들의 총합이  $1 \times 10^{-4}$  이하일 때, 농도장의 경우 각 격자점에서 기준값 및 신규값의 차이를 기준값으로 나눈 값이 모두  $1 \times 10^{-4}$  이하일 때로 하였다. 회박입자상에 기인한 일방향성 결합(one way coupling)에 근거하여 유체 유동장 및 정전장의 수렴된 결과를 입자 농도장에 대입하여 수렴된 입자농도 계산결과로부터 주어진 입자크기에 대한 웨이퍼 상부표면상의 입자침착속도를 구하였다. 수치해석방법에 대한 추가적인 내용은 Yoo and Oh (2005)의 연구에서 참고할 수 있다.

## 4. 결과 및 검토

### 4.1 기초 실험

그림 5는 그림 1에 도시된 바와 같이 DMA에서 분

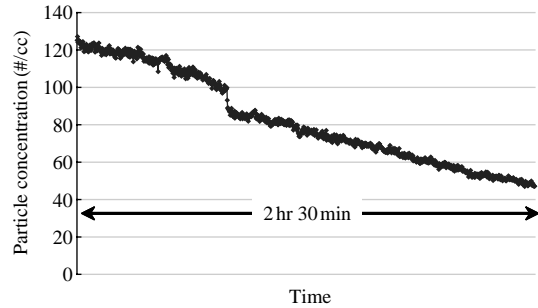


Figure 5. Variation of the particle concentration at the inlet of deposition chamber for 150 nm PSL particle.

급된 후 침착챔버로 공급되는 지름 150 nm PSL입자의 수농도를 입자계수기(CNC)로 실시간으로 5초 간격으로 측정된 결과를 보여준다. 그림으로부터 시간 경과에 따른 수농도의 감소가 실제로 발생함을 확인할 수 있다. 다른 지름인 100, 200, 300 nm 입자들에 대한 실험 결과에서도 각각의 기율기의 차이는 있었지만 수농도가 감소하는 현상을 모두 관찰할 수 있었다. 이는 PSL입자 수용액을 아토마이저를 통하여 PSL입자를 발생시키는 경우에 일반적으로 나타나는 현상이다. 따라서 침착챔버로 공급되는 PSL입자의 수농도를 5초 간격으로 침착실험동안 실시간으로 측정하였다.

그림 6은 침착챔버 내부에서 직경 200 mm의 반도체 웨이퍼로 공급되는 입자수농도를 측정하는 상황을 보여주고 있다. 챔버 벽에 직경 0.635 cm의 작은 구멍을 내어 SUS 관을 챔버 내부에 삽입하고 또 다른 CNC(TSI 3875)로 챔버 내 입자수농도를 측정하였다. SUS 관의 끝단은 웨이퍼 중심에서 반경방향으로 3 cm 떨어진 곳에 위치하며, SUS 관 하부는 웨이퍼가 있을 경우 웨이퍼 상부표면에서 0.165 cm 떨어진 곳에 위치한다. 그림 7은 그림 6과 같이 웨이퍼가 있는 경우와 없는 경우에 대해 샤워헤드를 통해 공급된 입자농도를 측정된 결과를 각각 보여주고 있다. 그래프상의 x축 P\_dma는 DMA를 통과한 입자농도, 즉 그림 1에 도시된 CNC에서 측정된 침착챔버로 공급되는 PSL입자의 수농도이고 y축 P\_chamber는 챔버내 입자농도, 즉 그림 6에 도시된 침착챔버 내부에서 측정된 PSL입자 수농도이다. 실험 결과로부터 샤워헤드에서 토출된 챔버 내 입자농도는 DMA를 통과한 입자농도와 정비례함을 확인할 수 있다. 챔버



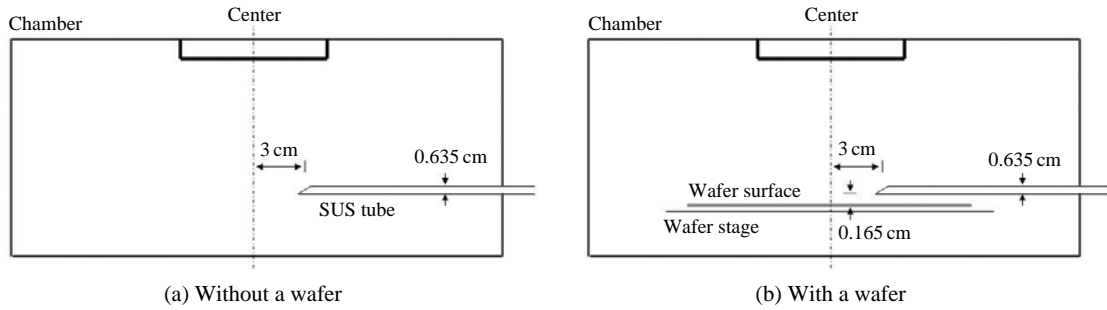


Figure 6. Schematic diagram of the particle concentration measurement inside the deposition chamber.

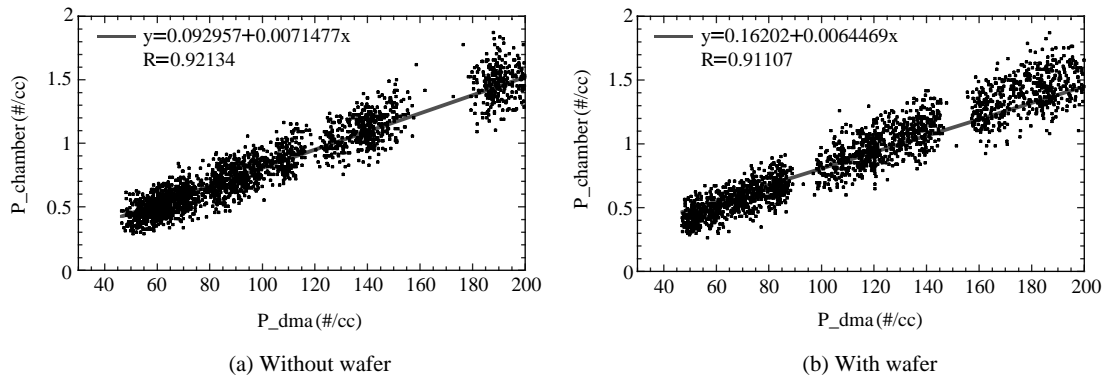


Figure 7. Variation of the measured particle concentration inside the chamber with respect to that at the inlet for 150 nm PSL particle.

내 입자농도는 DMA를 통과한 입자농도에 비해 1/100 이하로 감소되며 이는 DMA를 통과한 입자가 챔버 전체로 골고루 확산한 것에 기인한 것으로 판단된다. 또한 웨이퍼의 유무에 상관없이 동일한 상관성을 보여준다. 이는 샤워헤드 출구면으로부터 웨이퍼의 상부 0.165 cm 높이까지는 일정한 입자농도를 형성하고 있으며 웨이퍼 표면상의 입자농도 경계층은 웨이퍼 상부로부터 0.165 cm보다 더 얇게 형성되어 있음을 시사한다. 지면상 표시하지 않았지만 다른 입자크기의 경우에서도 모두 동일한 결과를 얻었다.

웨이퍼 상부 표면상에서 반경방향으로 분포된 입자농도를 관찰하기 위해 웨이퍼가 있는 경우에 대해 SUS 관의 끝단을 웨이퍼 중심으로부터 반경 0 cm, 3 cm, 6 cm, 9 cm 떨어진 위치에서 각각 DMA 통과 입자농도와 챔버 내 입자농도를 동시에 측정된 결과를 그림 8에 도시하였다. 그림으로부터 반경방향으로 거

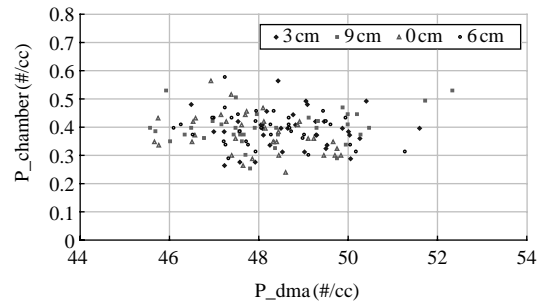


Figure 8. Variation of the measured particle concentrations in the radial direction of wafer for 150 nm PSL particle.

의 동일한 입자 분포가 형성됨을 관찰할 수 있으며 이는 입자농도 경계층 외부의 PSL 입자농도가 적어도 웨이퍼 상부영역에서는 일정하다는 것을 의미한다.

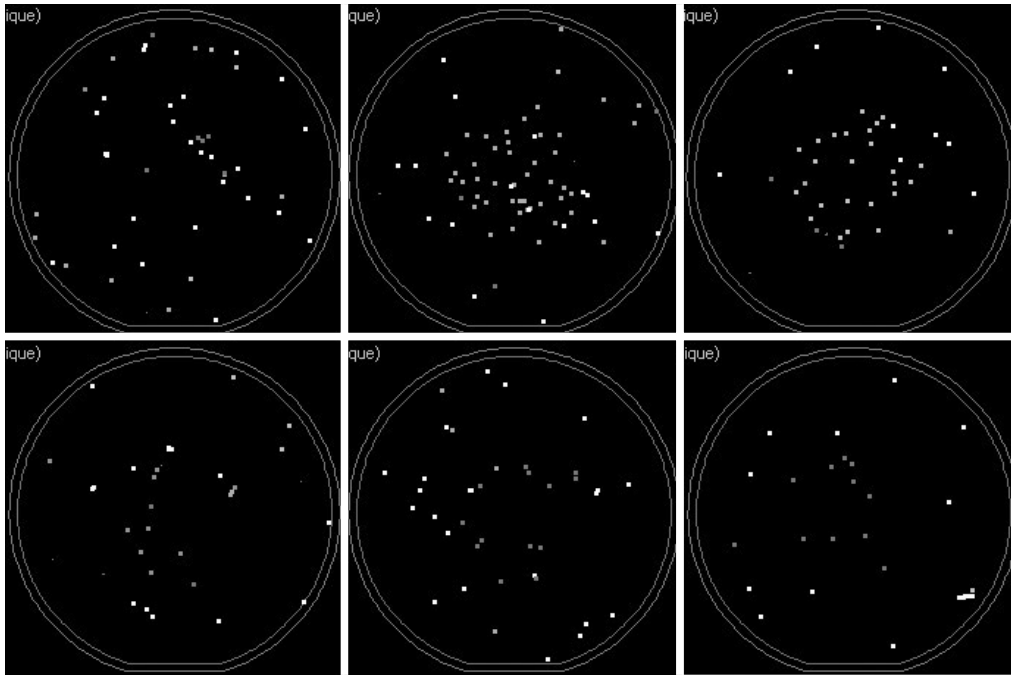


Figure 9. Measured particle deposition map on the uncharged wafer (from top left to bottom right 83, 100, 150, 200, 300, 495 nm).

#### 4. 2 200 mm 웨이퍼 입자침착 실험

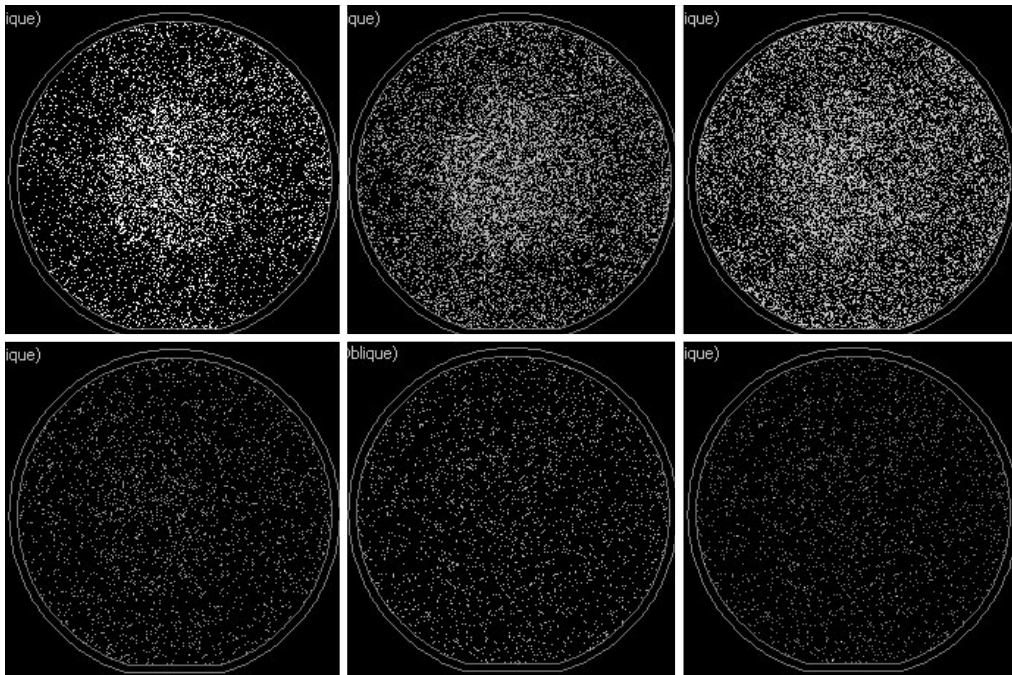
그림 9는 웨이퍼에 전압을 인가하지 않고 대류, 확산, 중력침강에 의한 입자전달만을 고려한 입자침착 맵 (map) 실험결과를 나타낸다. 그림 10은 웨이퍼에 5,000 V의 전압을 인가하여 정전 효과까지 고려한 입자침착 실험결과를 나타낸다. 입자침착 시간은 웨이퍼 부착 입자수의 조절을 위해 DMA를 통과한 입자농도에 따라 180~600초 범위에서 다르게 주었으나, 각각의 동일한 입자크기에 있어서는 0 V, 5,000 V의 전압조건에 상관없이 동일하게 주었다. 입자침착을 끝낸 웨이퍼는 웨이퍼표면 스캐너를 이용하여 입자가 침착된 형태를 확인하였다. 그림에서 입자크기는 상단 3개의 결과에 대해 좌측에서 차례로 83, 100, 150 nm, 하단은 200, 300, 495 nm이다. 그림의 입자침착 실험 결과로부터 전압을 인가하지 않은 웨이퍼는 침착된 입자수가 50개 미만으로 매우 적지만, 반면에 5,000 V의 전압이 인가된 웨이퍼는 침착된 입자수가 2,500~12,000개로 크게 증가됨을 알 수 있다. 특이한 점으로 5,000 V의 전압이 인가된 웨이

퍼 입자침착의 경우 웨이퍼 전체면에 고루 입자가 침착되었지만 작은 입자의 경우에서 웨이퍼 중앙에 입자가 좀더 몰려 있음을 확인할 수 있다. 이는 동일한 전기장 및  $-1$ 가의 동일한 입자전하 조건에서 기계적 유동율이 상대적으로 큰 작은 입자들이 정전인력에 의해 곧바로 샤워헤드의 직하방에 있는 웨이퍼 상부표면에 더 많이 침착되는 결과이다.

#### 4. 3 입자침착속도

그림 11은 여러 가지 직경의 반도체 웨이퍼에 대해 입자크기에 따른 웨이퍼 상부표면상의 평균입자침착속도의 변화를 보여주고 있다. 그림으로부터 웨이퍼에 전압이 인가되지 않는 경우 웨이퍼의 직경이 100 mm에서 200 mm, 300 mm로 증가되면 입자침착속도가 증가함을 알 수 있다. 이는 그림 12에 도시된 바와 같이 웨이퍼 직경의 증가로 인해 웨이퍼 상부표면상의 유체의 속도경계층이 벽면에 더욱 밀착되어서 입자의 농도경계층의 기울기를 더욱 급격하게 만들기 때문이다. 따라서 이러한 농도구배에 비례하





**Figure 10.** Measured particle deposition map on the charged wafer with 5,000 V (from top left to bottom right 83, 100, 150, 200, 300, 495 nm).

는 브라운확산이 지배적인 100 nm 이하의 입자크기 영역에서 입자침착속도가 증가하게 된다. 그림 12에서 균일 경계층의 두께  $(\delta/R)_{stag}$ 은 Von Karman이 무한원판상의 정체점 유동에 대해 해석적으로 유도한  $(\delta/R)_{stag} = \frac{2.759}{R} \sqrt{\frac{\mu}{2\rho a}}$ 이며  $a$ 는 유동강도로서  $a = \frac{2U_0}{\pi R}$ 이다(유경훈, 2002).

웨이퍼에 5,000 V가 인가되면 1,000 nm 이하의 입자크기영역에서는 입자침착속도가 최대로 약 3개 정도(order)만큼 크게 증가하고 1,000 nm 이상의 큰 입자크기영역에서는 0 V의 경우와 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 1,000 nm 이상의 입자크기영역에서는 유체의 경계층의 영향을 받지 않는 중력침강이 여전히 입자침착을 지배하여 모든 침착속도곡선들이 한 곡선으로 합쳐지지만 1,000 nm 이하의 입자크기영역에서는 정전인력이 입자침착을 지배하기 때문이다. 동시에 웨이퍼의 직경이 100 mm에서 200 mm, 300 mm로 증가되면 1,000 nm 이하의 입자크기영역에서

입자침착속도가 증가함을 알 수 있다. 이는 웨이퍼의 직경이 증가함에 따라 동일한 인가전압 5,000 V에 대한 웨이퍼 상부 표면상의 평균 전기장강도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 그림 11에서 입자침착속도 곡선들이 모두 전형적인 ‘V’자형 특성곡선을 보여주고 있으며 최소 침착속도의 입자크기가 0 V에서 5,000 V가 인가되면 300 mm 웨이퍼의 경우 약 250 nm에서 1,700 nm로 증가됨을 알 수 있다.

한편, 그림에는 비교를 위하여 본 연구의 200 mm 웨이퍼에 대한 실험결과와 본 연구와 동일한 조건하에서 전압이 인가되지 않은 100 mm 웨이퍼에 대한 Ye *et al.* (1991)의 실험결과, 본 연구와는 달리 직경이 100 mm보다 큰 작업대 (wafer stage)의 중앙에 수평으로 놓인 100 mm 웨이퍼에 대한 Opiolka *et al.* (1994)의 실험결과가 함께 도시되어 있다. 먼저 전압이 인가되지 않은 200 mm 웨이퍼의 경우 본 연구의 계산결과는 본 연구의 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 게다가 본 연구의 200 mm 웨이퍼에 대한 실험결과는 100 mm 웨이퍼에 대한

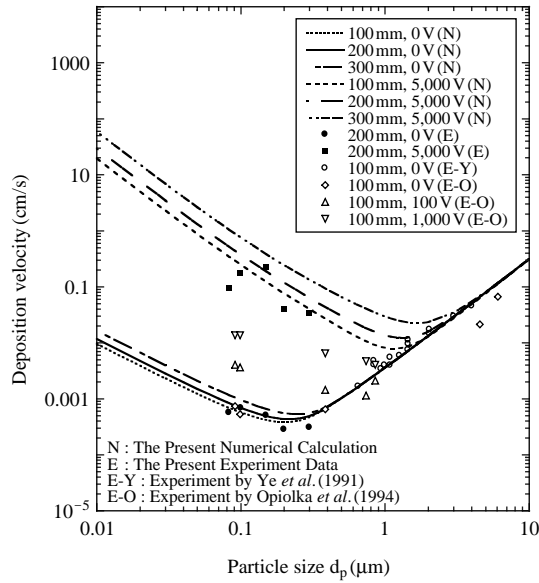


Figure 11. Variation of the averaged deposition velocity with respect to particle size for various wafer diameters.

Opiolka *et al.* (1994)의 실험결과와도 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 2가지 사항에 근거한 것이라고 볼 수 있다. 첫째, 100 mm와 200 mm의 계산결과에서 관찰할 수 있는 바와 같이 2개의 계산결과가 서로 크게 차이가 나지 않는다는 것이다. 둘째, Opiolka *et al.* (1994)의 입자침착 실험이 유경훈 등 (1995)이 지적한 바와 같이 직경이 100 mm보다 큰 작업대의 중앙에 놓여져서 200 mm 웨이퍼와 비슷한 입자침착 양상을 보인다는 것이다.

5,000 V가 인가된 웨이퍼의 경우 본 연구의 200 mm 웨이퍼에 대한 실험결과는 계산결과보다 다소 낮게 산재해 있음을 알 수 있다. 이는 그림 2에 도시된 바와 같이 웨이퍼 인가전압이 웨이퍼 스테이지의 인가전압 5,000 V보다 실제적으로 조금 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 직경 200 mm 웨이퍼에 대해 인가전압이 5,000 V로 증가하면 전압이 인가되지 않은 경우보다 입자침착이 크게 증가됨을 알 수 있다. 이러한 인가전압이 증가함에 따른 입자침착 속도의 증가 경향은 그림에 함께 도시된 직경 100 mm 웨이퍼에 대한 Opiolka *et al.* (1994)의 실험결과에서도 관찰할 수 있다. 또한, 직경 100, 200, 300 mm 웨이퍼에 대한 수치해석 결과로부터 동일한 인가전

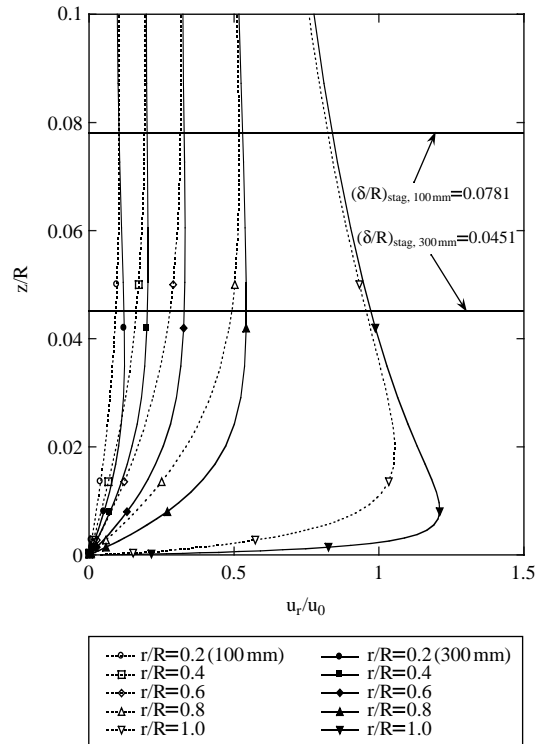


Figure 12. Comparison of the near-surface distributions of radial flow velocity on the upper surface of the wafers with the diameters of 100 and 300 mm ( $U_0=0.3$  m/s).

압에서 웨이퍼 직경이 증가하면 입자침착이 증가함을 보여주고 있다. 이는 웨이퍼 상부 표면상의 평균 전기장강도가 증가함에 따른 입자의 정전속도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

클린룸 환경에서 최대 5,000 V의 정전효과가 고려된, 직경이 100 mm보다 큰 200 mm, 300 mm 반도체 웨이퍼 상부 표면으로의 입자침착에 대한 실험적, 수치해석적 연구를 수행하고 본 연구의 실험결과 및 계산결과, 기존의 실험결과와의 비교 분석을 통하여 다음과 같은 사항들을 관찰할 수 있었다.

(1) 본 연구에서 수행한 직경 200 mm 반도체 웨이퍼에 대한 입자침착속도 실험방법은 본 연구의 계산

결과 및 기존의 실험결과에 대해 타당한 실험결과를 제시함을 알 수 있었다.

(2) 전압이 인가되지 않은 경우 웨이퍼 직경이 증가하면 100 nm 이하의 입자크기영역에서 입자침착속도가 증가될 것으로 판단된다. 이는 웨이퍼 직경의 증가로 인한 웨이퍼 상부표면상의 입자의 농도경계층의 기울기가 더욱 급격해져서 브라운확산을 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 직경 200 mm 웨이퍼의 경우 인가전압이 5,000 V가 되면 인가전압이 없는 경우보다 1,000 nm 이하의 입자크기영역에서 입자침착이 크게 증가됨을 알 수 있었다. 이는 정전인력이 입자침착을 지배하기 때문인 것으로 판단된다.

(4) 인가전압이 5,000 V인 경우 웨이퍼 직경이 증가되면 1,000 nm 이하의 입자크기영역에서 입자침착속도가 증가될 것으로 판단된다. 이는 웨이퍼 직경이 증가함에 따라 웨이퍼 상부표면상의 평균 전기장강도가 증가하여 입자의 정전속도가 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 유경훈 (2002). 가열되는 회전원판으로의 입자침착 해석, 대한기계학회 논문집, 26, 245-252.
- 유경훈, 오명도, 명현국 (1995). 가열 또는 냉각되는 수평웨이퍼 표면으로의 입자침착에 관한 해석, 대한기계학회 논문집, 19, 1319-1332.
- Bae, G.N., Lee, C.S., and Park, S.O. (1994). Measurement of particle deposition velocity toward a horizontal semiconductor wafer using a wafer surface scanner, *Aerosol Science and Technology*, 21, 72-82.
- Chein, R., and Su, T. (2004). Numerical modeling of particle dynamics in a cylindrical chamber containing a rotating disk, *Aerosol Science and Technology*, 38, 185-193.
- Hayakawa, I., Fujii, S., and Kim, K.Y. (1986). Studies on particulate behavior and adhesion in laminar air-flow clean room, *Proc. of the 32nd Annual Technical Meeting, Institute of Environmental Sciences*, May 6-8, Dallas, TX, USA, pp. 483-486.
- ITRS (2007). *International Technology Roadmap for Semiconductors*, Overall Roadmap Technology Characteristics, 77-78.
- Liu, B.Y.H., and Ahn, K.H. (1987). Particle deposition on semiconductor wafers, *Aerosol Science and Technology*, 6, 215-224.
- 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.
- Opiolka, S., Schmidt, F., and Fissan, H. (1994). Combined effects of electrophoresis and thermophoresis on particle deposition onto flat surfaces, *J. Aerosol Science*, 25, 656-671.
- Otani, Y., Emi, H., Kanaoka, C., and Kato, K. (1989). Determination of deposition velocity onto a wafer for particles in the size range between 0.03 and 0.8  $\mu\text{m}$ , *J. Aerosol Science*, 20, 787-796.
- Pui, D.Y.H., Ye, Y., and Liu, B.Y.H. (1990). Experimental study of particle deposition on semiconductor wafers, *Aerosol Science and Technology*, 12, 813-831.
- Stratmann, F., and Whitby, E.R. (1989). Numerical solution of aerosol dynamics for simultaneous convection, diffusion and external forces, *J. 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, *J. Aerosol Science*, 22, 63-72.
- Yoo, K.-H., and Oh, M.-D. (2005). Numerical analysis on flow field and particle deposition on a heated spinning disk, *J. Aerosol Science*, 36, 235-246.