

〈논 문〉

정전효과가 있는 가열 수평웨이퍼로의 입자침착에 관한 해석

유경훈* · 오명도** · 명현국***

(1996년 11월 21일 접수)

Analysis on Particle Deposition onto a Heated, Horizontal Freestanding Wafer with Electrostatic Effect

Kyung Hoon Yoo, Myung Do Oh and Hyon Kook Myong

Key Words : Horizontal Freestanding Wafer(수평웨이퍼), Deposition Velocity(침착속도), Brownian and Turbulent Diffusion(브라운확산과 난류확산), Sedimentation(침강), Thermophoresis(열영동), Electrostatic Force(정전기력), Boltzmann Equilibrium Charge(볼츠만 평형전하)

Abstract

The electrostatic effect on particle deposition onto a heated, horizontal freestanding wafer surface was investigated numerically. The deposition mechanisms considered were convection, Brownian and turbulent diffusion, sedimentation, thermophoresis and electrostatic force. The electric charge on particle needed to calculate the electrostatic migration velocity induced by the local electric field was assumed to be the Boltzmann equilibrium charge. The electrostatic forces acted upon the particle included the Coulombic, image, dielectrophoretic and dipole-dipole forces based on the assumption that the particle and wafer surface are conducting. The electric potential distribution needed to calculate the local electric field around the wafer was calculated from the Laplace equation. The averaged and local deposition velocities were obtained for a temperature difference of 0-10K and an applied voltage of 0-1000V. The numerical results were then compared with those of the present suggested approximate model and the available experimental data. The comparison showed relatively good agreement between them.

기호설명

B : 입자의 기계적 유동률($=\frac{C_s}{3\pi\mu d_p}$)
 C : 입자농도의 시간평균성분
 d_p : 입자지름

*회원, 한국생산기술연구원 자본재설비기술개발센터 냉동공조연구팀

**회원, 서울시립대학교 정밀기계공학과

***회원, 국민대학교 기계·자동차공학부

D_t : 난류확산계수
 E_{er} : 평균전기장강도
 F_e : 정전기력
 k : 난류운동에너지
 m_p : 가변수(dummy variable)
 q_e : 기본전하($=1.6 \times 10^{-19}C$)
 R : 웨이퍼반경
 S : 밀도비($=\rho_p/\rho_{air}$)
 \bar{Sh} : 평균 Sherwood 수
 T : 시간평균온도

- U : 공기의 시간평균속도
- u^p : 입자의 순간속도
- U_t : 마찰속도 ($=\sqrt{\tau_w/\rho_{air}}$)
- x : 좌표
- δ : Kronecker delta
- ϵ_0 : 자유공간의 유전율 ($=8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$)
- μ : 공기의 분자점성계수
- ν_t : 공기의 동점성계수
- Φ_w : 웨이퍼전위
- ρ_{air} : 공기밀도
- τ_p : 입자이완시간 ($=\frac{\rho_p d_p^2 C_s}{18\mu}$)
- c : 입자의 순간농도
- C_s : 미끄럼보정인수
- D_B : 브라운확산계수 ($=\frac{xTC_s}{3\pi\mu d_p}$)
- E : 국소전기장성분
- f : 입자의 부분율
- g : 중력가속도
- K : 열영동계수
- n_p : 입자의 기본전하수
- q_p : 입자 전하
- Re_R : 웨이퍼반경기준 Reynolds 수
- Sc : 입자의 Schmidt 수 ($=\frac{\nu}{D_B}$)
- Stk : Stokes 수 ($=\frac{\tau_p U_0}{R}$)
- u : 공기의 순간속도
- U_0 : 자유유동속도
- U^p : 입자의 시간평균속도
- V_{dep} : 입자침착속도
- y : 벽면으로부터의 수직거리
- ϵ : 난류에너지 소산율
- x : 볼츠만상수 ($=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$)
- ν : 공기의 동점성계수
- Φ : 전위
- ρ_p : 입자밀도
- σ_p : 볼츠만전하분포의 표준편차
- τ^* : 무차원 입자이완시간 ($=\frac{U_0^2 \tau_p}{\nu}$)

1. 서 론

반도체 웨이퍼 표면상에 침착된 입자들은 집적회

로의 오동작을 유발시켜 제품의 수율 및 신뢰성을 저하시키므로 클린룸내의 입자제어문제는 마이크로 전자산업에 있어 매우 중요하다. 집적회로의 특성 크기가 현행 4Mbit/0.75 μm , 16Mbit/0.5 μm DRAM 칩에서 이미 서브마이크론 수준을 달성하였고 다가올 차세대 집적회로인 64Mbit/0.35 μm , 256Mbit/0.25 μm DRAM 및 향후의 디바이스들은 극미세화의 일로를 걷고 있다. 현재, 차세대 칩의 생산을 위한 요구청정도는 각각 0.1 μm 기준 class 0.1과 class 0.01의 수준이 제시되고 있고⁽¹⁾ 이와 더불어 제어대상 입자크기가 회로선폭의 1/10 수준까지 이루어져야 하므로 거의 0.01 μm 까지에 이르는 대부분의 대기부유 오염입자들을 제어해야 하는 시점에 이르렀다. 한편, 개선된 클린룸 및 제조설비에도 불구하고 생산공정중의 웨이퍼 근방에서는 여전히 입자들의 존재가 확인되고 있어 완벽한 무진조건의 달성은 불가능할 것으로 판단된다.

서브마이크론 입경영역에서의 웨이퍼 표면상의 입자침착은 대류, 브라운확산, 난류확산, 침강, 열영동, 정전기력 등의 다양한 입자전달 메커니즘들이 복합적으로 얽혀 있어 이들 상호간의 기여도에 대한 정보는 입자제어전략을 수립하는 데 있어 필수적으로 요구된다. 최근 Ye et al,⁽²⁾ Opiolka et al.,⁽³⁾ 배귀남 등⁽⁴⁾의 실험 결과들과 Opiolka et al.⁽⁵⁾과 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 수치해석 결과들로부터 클린룸내의 층류 및 난류유동장내에서 웨이퍼의 온도가 주위공기의 온도보다 약간만 높아도 웨이퍼 표면으로의 입자침착이 상당히 억제된다고 밝혀졌다. 한편 Wilson⁽⁸⁾과 Sakata et al.⁽⁹⁾은 반도체 제조공정중에 웨이퍼의 전위가 100V-4000V에 이르는 상당히 높은 수준으로 하전됨을 보고하였고 이는 서브마이크론 입자의 매우 높은 전기적 유동률과 하전된 웨이퍼 주위의 강한 전기장에 의한 입자침착량의 대폭적인 증가가 있을 것임을 시사해 준다.

미세입자들의 중요성이 증대되고 있는 시점에서 웨이퍼상의 입자침착을 효과적으로 제어하기 위하여 반도체 제조공정중의 제품의 정전기 대책이 마련되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 정전기력과 열영동력의 복합효과를 고찰하기 위하여 대류, 브라운 및 난류 확산, 침강, 열영동력, 정전기력이 모두 고려되는 수평웨이퍼로의 입자침착현상에 대한 수치해석적 모사를 수행하였다. 본 연구에서의 기계적, 전기적 변수, 상수, 물성치들은 모두

SI 시스템의 MKS 단위계로 계산되고 표시되었고 정전기력 이외의 관련 항목은 근본적으로 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 연구와 동일하므로 본문 중의 미언급부분을 참조할 수 있다. 참고로 본문 중에 언급되지 않은 변수 및 기호는 '기호설명' 부분에 나타내었다.

2. 수치해석적 모사

2.1 계산영역 및 지배방정식

전형적인 웨이퍼 배치형상인 자유롭게 떠있는 수평웨이퍼가 Fig. 1에 도시되어 있다. Fig. 1에 도시된 계산영역은 축대칭 2차원이며 상부의 유입구에

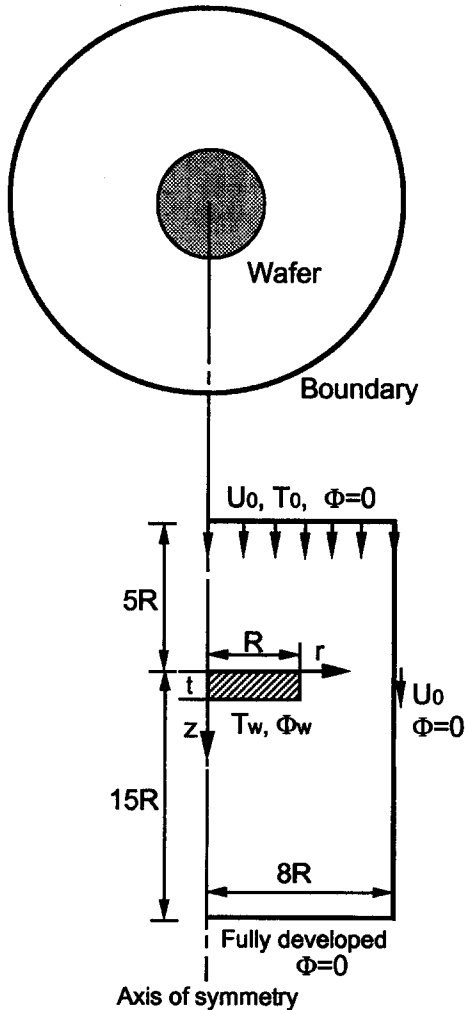


Fig. 1 Calculation domain for particle deposition on a freestanding wafer with electrostatic effect

서 속도 U_0 , 온도 T_0 의 자유유동이 웨이퍼 상부면에 수직으로 충돌하고 공기유동내에는 입자들이 부유되어 있다. 수평웨이퍼는 주위공기보다 높은 T_w 의 온도로 가열되어 있고 Φ_w 의 양의 전위로 하전되어 있다.

유체 지배방정식은 클린룸내의 회박입자유동에 근거하여 유체로의 영향을 무시하고 일반적으로 에어로졸입자는 높은 Schmidt 수 ($10^2 < \frac{\nu}{D_B} < 10^7$)를 가지기 때문에 벽면근처의 아주 좁은 영역내에서 농도장의 급격한 변화가 예상되므로 벽면으로부터 k 와 ϵ 을 바로 계산할 수 있는 Launder and Sharma⁽¹⁰⁾의 저 레이놀즈수 난류모델을 선택하였다.

입자 지배방정식은 회박입자유동에 근거하여 다음과 같이 오일러 관점에 의한 국소적으로 공간평균된 정상상태에서의 연속방정식과 운동량방정식으로 기술될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u^j c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (c u^j u^i) = -\frac{c}{\tau_p} (u_i - u^i) + c \left(1 - \frac{1}{S} \right) g \delta_{ij} - \frac{c}{\tau_p} K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial x_i} + \frac{cB}{\tau_p} (F_e)_i \quad (2)$$

여기서 u^j 는 입자의 속도, c 는 입자의 순간농도, D_B 는 브라운확산계수이고 τ_p 는 입자이완시간, u 는 유체의 순간속도, T 는 평균온도, S 는 밀도비 ρ_p / ρ_{air} 로서 본 연구에서는 $S \gg 1$ 이고, δ 은 Kronecker delta, g 는 중력가속도이고 ν 는 공기의 동점성계수, K 는 열영동계수, B 는 기계적 유동률 (mechanical mobility), F_e 는 정전기력이다. 식 (1)과 (2)를 유도하는 데 있어 브라운 유속을 입자 속도 u^j 와는 무관하다고 간주되었다.⁽¹¹⁾

본 연구의 유동장 계산결과로부터 얻어지는 웨이퍼 표면상의 평균마찰속도 $U_\tau = 0.0494$ m/s로부터 본 연구의 난류유동장에서의 무차원 입자이완시간 $\tau^* = \frac{U_\tau^2 \tau_p}{\nu}$ 는 $10 \mu\text{m}$ 크기입자에 대해 $0.05 (\ll 1)$ 가 얻어지고 평균유동에 대한 Stokes 수 $Stk = \frac{\tau_p U_0}{R}$ 는 $10 \mu\text{m}$ 입자에 대해 $0.002 (\ll 1)$ 이므로 난류 및 층류유동장내에서의 입자의 관성력을 모두 무시할 수 있다.⁽⁷⁾ 이로부터 유도되는 입자연속방정식 (1)에 대해 Reynolds 평균을 취하고 그로부터 생성되는 입자농도 요동성분과 유체속도 요동성분의 상관항을 와확산계수개념과 등방성가정을 도입하여 다음

과 같이 유도하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (U_j^* C) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left((D_B + D_i) \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (3a)$$

$$U_j^* = U_j + \tau_{pg} \delta_{j1} - K \frac{\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial x_j} + B(F_e)_j \quad (3b)$$

여기서 U 와 C 는 각각 유체의 평균속도와 입자의 평균농도이다. 본 연구에서는 Oh et al.,⁽⁷⁾ Abuzeid et al.⁽¹²⁾의 연구를 바탕으로 입자의 난류확산 계수 D_i , 유체의 와점성계수 ν 와 같다고 가정하였다.

2.2 입자전하와 정전기력

대기공기에는 양이온과 음이온이 우주선과 자연 방사능에 의하여 계속적으로 생성된다. 에어로졸입자들이 충분히 오랜 시간동안 이러한 이극성 이온들(bipolar ions)에 노출되면 볼츠만(Boltzmann) 평형전하분포를 띠게 된다.⁽¹³⁾ 또한 이 분포는 높은 전하를 띤 입자가 중화과정을 통하여 달성할 수 있는 최소전하수준으로 대표되기도 한다. 실제적인 에어로졸입자전하는 입자의 크기, 모양, 성분, 발생특성에 따라서 볼츠만 평형전하의 최고 10^5 수준에 달할 수 있다고 보고되고 있다.⁽¹⁴⁾ 그러나 아직까지 클린룸 환경하의 에어로졸입자 전하분포와 관련된 실험결과가 거의 없다. 최근 Pui et al.⁽¹⁵⁾ 등은 디스크 드라이버내의 입자전하수준이 볼츠만 rms 전하의 2~15배임을 측정하였다.

본 연구에서는 클린룸내의 입자전하분포를 최소 수준으로 고려하여 다음의 볼츠만 평형전하분포에 대해 고찰하였다.^(13,15)

$$f(n_p) = \frac{\exp(-n_p^2/2\sigma_p^2)}{\sum_{m_p=-\infty}^{\infty} \exp(-m_p^2/2\sigma_p^2)} \quad (4)$$

$$\sigma_p = \sqrt{2\pi\epsilon_0 d_p \chi T} / q_e$$

여기서 f 는 n_p 개의 기본전하를 가지는 입자의 부분율, n_p 는 기본전하수, m_p 는 가변수(dummy variable), σ_p 는 표준편차, ϵ_0 는 자유공간의 유전율, d_p 는 입자지름, χ 는 볼츠만상수, T 는 절대온도, q_e 는 기본전하이이다.

정전효과를 고려하기 위하여 입자와 웨이퍼는 전기적 전도체로 가정하고 다음의 4가지 정전기력을 동시에 고려하였다.⁽¹⁶⁾

$$(F_e)_j = q_p E_j - \frac{q_p^2}{16\pi\epsilon_0 y^2} + \left(\frac{q_p E_j d_p^2}{16y^3} - \frac{3\pi\epsilon_0 d_p^2 E_j^2}{y^4} \right) \delta_{j1} \quad (5)$$

여기서 E 는 국소 전기장, y 는 웨이퍼표면으로부터의 수직거리이다. 식 (5)에서 우변의 첫번째 항은 쿨롱력, 두번째 항은 이미지력, 세번째 항은 외부 전기장에 의해 입자내에 유도된 쌍극자(dipole)가 전도체 표면상의 자신의 이미지전하에 의해 형성된 전기장의 구배에 의해 받는 힘(dielectrophoretic force), 네번째 항은 쌍극자가 자신의 이미지에 의해 받는 힘(dipole-dipole force)이다. 식 (5)에서 몇 가지 주목할 사항은 이미지력은 외부인가 전기장이 없는 경우에도 항상 존재하고, 이미지력과 dipole-dipole force는 항상 입자와 표면간에 인력으로 작용하며 쿨롱력과 dielectrophoretic force는 입자전하와 외부전기장의 극성에 의존하여 인력 또는 척력으로 작용한다는 것이다.

입자전하 q_p 와 그의 제곱은 다음과 같이 얻어졌다.

$$q_p = -\frac{q_e}{2} \sum_{n_p=-\infty}^{\infty} |n_p| f(n_p) \quad (6a)$$

$$q_p^2 = q_e^2 \sum_{n_p=-\infty}^{\infty} n_p^2 f(n_p) \quad (6b)$$

웨이퍼 표면은 양전압이 인가되는 경우를 선택하여 인력이 작용하는 음의 입자전하만을 고려하게 되고 볼츠만 평형전하분포는 $n_p=0$ 에 대해 대칭을 이루고 있으므로 1/2이 곱해졌다.

웨이퍼 주위의 국소 전기장성분을 구하기 위하여 전도체 웨이퍼의 가정으로 인가전압 Φ_w 로 균일하게 유지되는 경우가 고려되었고 계산영역에 걸쳐 다음의 라플라스(Laplace) 방정식이 도입되었다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_j^2} = 0 \quad (7)$$

Fig. 2에는 균일 전기장강도 $E=1 \times 10^4$ V/m 내에서 볼츠만 평형전하분포를 가지는 입자의 경우에 쿨롱력과 이미지력에 의해 유도되는 입자속도가 입자크기별로 도시되어 있다. 쿨롱력 및 이미지력 모두에서 $d_p=0.02 \mu\text{m}$ 경우에 최대값을 가지고 있음을 알 수 있다. 쿨롱력은 벽으로부터의 수직거리에 무관하나 이미지력은 수직거리가 증가함에 따라 급격하게 감소함을 알 수 있다. 또한, 주어진 전기장 강도하에서는 쿨롱력이 이미지력을 압도함을 알 수 있으나 전기장강도가 이로부터 감소한다면 벽면 바로근처의 영역에서는 이미지력의 기여도가 다소 증가될 것이 예상되나 아주 좁은 국소영역에만 국한되므로 그다지 큰 침착량의 증가는 예상되지 않는다

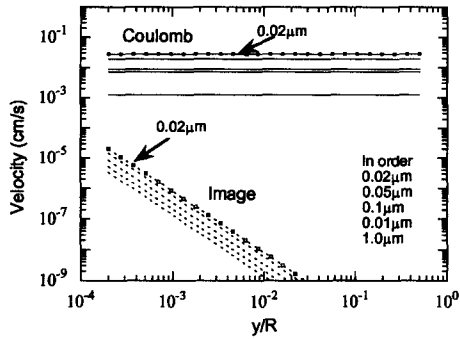


Fig. 2 Comparison of Coulomb and image forces($E = 1.0 \times 10^4$ V/m)

다. 그림에는 도시되지 않았으나 dielectrophoretic force와 dipole-dipole force의 경우는 상기의 것들에 비하여 무시할 만 하였다.

2.3 계산 및 경계조건과 수치해석방법

해석에 도입된 입자는 PSL 입자이고 유입속도는 0.3 m/s가 선택되었다. 웨이퍼벽면에서의 입자농도 경계조건은 입자의 차단효과(interception effect)를 도입하여 입자의 반경위치에서 $C=0$ 을 지정하였다. 계산격자는 175(axial) \times 104(radial)이 사용되었고 입자농도장을 계산하는데 있어 입자속도장이 연속법칙을 만족치 않으므로 Stratmann and Whibty⁽¹⁷⁾가 지적한대로 Patankar⁽¹⁸⁾의 알고리즘을 보정하였다. 한편, 침착속도의 계산에 필요한 웨이퍼 벽면으로의 입자유속은 Patankar 알고리즘의 차분도식시에 나타나는 웨이퍼 벽면에 바로 위치한 검사면을 통과한 확산유속과 대류유속의 합인 총입자유속으로부터 산출되었다.

전기장의 산출을 위한 전압방정식 (7)의 계산수렴조건은 계산영역내의 모든 격자에서의 이전 계산값과 새로운 계산값 사이의 차이를 이전 계산값으로 나눈 상대값이 1×10^{-4} 이하일 경우로 하였다. 전압분포에 대한 격자시험 결과 상기의 175(axial) \times 104(radial)의 경우와 양방향으로 각각 20개씩 증분한 경우가 서로 동일한 결과가 얻어짐을 확인하였다. Fig. 3에는 웨이퍼 전위 $\Phi_w = 10, 100, 1000$ V인 경우에 대한 웨이퍼 상부표면 상의 전압분포가 도시되어 있다. 웨이퍼상의 입의 반경좌표 r 에서 세 가지 인가전압에 대한 무차원 전압분포가 모두 동일함을 알 수 있고 이는 라플라스방정식의 일반적인 특성에 기인한 것이다. 또한, 웨이퍼의 중

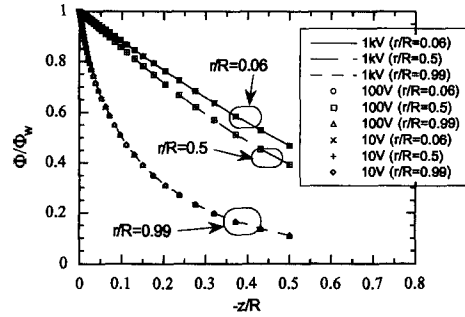


Fig. 3 Variation of the voltage profiles on the upper surface of the wafer with respect to applied voltage

심부에서 가장자리로 갈수록 전압분포상의 벽면 근처의 기울기가 더욱 급격해지고 있으므로 전기장의 강도가 증가되고 있음을 알 수 있다. 이외의 관련 사항은 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 연구와 모두 동일하므로 관련내용들을 참조할 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 평균 입자침착속도

Fig. 4는 층류와 난류유동장하에서 열영동력이 고려되지 않는 경우에 대한 정전기력의 효과를 보여주고 있다. 식 (5)에서 고찰하였듯이 이미지력은 외부인가 전기장과는 무관하므로 웨이퍼 전위가 0 V일 때 층류와 난류의 경우 모두 이미지력이 고려되고 있다. 0 V인 경우를 살펴보면 그림에는 도시되어 있지 않으나 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 중성 입자의 결과와 거의 차이가 없으며 전형적인 'V'자형 침착속도 특성곡선을 보여주고 있고 약 $0.3 \mu\text{m}$ 이하에서 난류의 경우가 층류보다 약간 높은 침착속도를 보여주고 있는 것으로 미루어 여전히 확산이 입자침착을 지배하고 있음을 알 수 있다. 웨이퍼의 전위가 점점 증가함에 따라서 침착속도가 대폭적으로 증가되어 1 kV의 경우는 0 V의 경우에 비하여 서브마이크론 입자크기영역에서 약 2개 정도(order)만큼의 침착증가가 발생하였고 침착특성곡선의 개형이 변형되어 약 $0.025 \mu\text{m}$ 에서 최대 피이크를 이루며 이보다 입자크기가 감소되면 침착속도가 감소하는 역전 현상이 발생되었음을 알 수 있다. 이는 이 미세입자크기영역의 입자들이 잘 하전되어지지 않는 효과 때문이다. 이러한 경향은 이전의 다른 기하학적 유동장형태인 정체점, 평판, 채

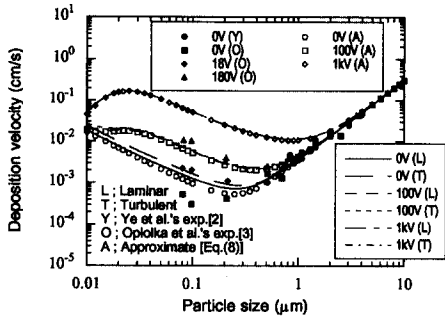


Fig. 4 Variation of the averaged upper deposition velocities with respect to particle size for the unheated wafer

널유동에서의 Cooper et al.⁽¹⁶⁾과 Li and Ahmadi,⁽¹⁹⁾ Fan and Ahmadi⁽²⁰⁾의 수치연구결과에서도 관찰되었다. 그리고 웨이퍼 전위 100V 이상에서는 층류와 난류의 차이가 관찰되지 않으므로 완전히 정전력이 입자침착을 지배하게 됨을 알 수 있다. $d_p > 1.0 \mu\text{m}$ 이상에서는 0V-1kV의 경우 모두 여전히 중력이 입자침착을 지배하여 모든 특성곡선들이 한 곡선으로 합쳐짐을 알 수 있다.

결론적으로, 반도체 제조공정에서는 웨이퍼가 가열과 냉각이 반복되기는 하지만 웨이퍼의 온도가 주위와 동일한 수준으로 유지될 경우 (물론, 냉각의 경우는 더욱 심각하나^(6,7)) Welson⁽⁸⁾과 Sakata et al.⁽⁶⁾이 보고한 수준인 100 V~4000 V로 웨이퍼가 하전될 경우 최소 입자전하 수준인 Boltzmann 평형전하에서조차 기존의 4 Mbit/0.75 μm , 16 Mbit/0.5 μm 뿐만 아니라 차세대 64 Mbit/0.35 μm , 256 Mbit/0.25 μm 반도체칩들은 정전효과에 의하여 상당한 제품수율의 손해를 초래할 수 있음을 알 수 있다. 게다가 차세대 디바이스들의 회로 선폭의 1/10로 간주되는 임계입자크기가 각각 0.025 μm 과 0.035 μm 이어서 모두 최대 피크 근방에 밀집되므로 더욱더 정전기대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 또한 본 연구의 수치해석결과와의 비교를 위하여 본 연구의 계산조건과 모든 것이 동일한 Ye et al.⁽²⁾의 0 V에 대한 PSL 입자(0.6 μm ~5 μm) 실험결과와 본 연구와 동일한 웨이퍼가 넓은 작업대의 중앙정체점에 놓여진 경우인 Opiolka et al.⁽³⁾의 0 V, 18 V(10 V/cm), 180 V(100 V/cm)에 대한 PSL 입자(0.08 μm ~3 μm) 실험결과, 그리고 아래의 식으로 표현되는 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾

의 모델과 근본적으로 동일하면서 쿨롱력이 추가로 고려된 입자침착속도 근사모델의 계산결과가 함께 도시되어 있다.

$$V_{dep} = \frac{-(V_{sed} + V_{the} + V_{ete})}{\exp\left(-\frac{(V_{sed} + V_{the} + V_{ete})}{V_{dif}}\right) - 1} \quad (8)$$

여기서

$$V_{dif} = \frac{D_B \bar{S} \bar{h}}{2R}, \quad V_{sed} = \tau_p g, \quad V_{the} = \frac{0.5K(T_0/T_w - 1)}{Re_R^{1/2}}$$

U_0 , $V_{ete} = Bq_p E_{ef}$ 이고 $\bar{S} \bar{h}$ 는 웨이퍼상부에서의 평균 Sherwood 수,^(6,7) $E_{ef} = \frac{5.67 \Phi_w}{2R}$, R 은 웨이퍼반경이다. 여기서의 E_{ef} 는 웨이퍼 상부표면상의 평균 전기장강도로서 식 (7)로부터 계산된 웨이퍼 표면상의 전압분포에서 웨이퍼 벽면의 전압과 이로부터 10 μm 떨어진 바로위의 격자점에서의 전압으로부터 유도된 z 방향 전기장성분들을 웨이퍼 표면적에 대하여 평균함으로써 유도한 것이다. Otani et al.⁽²¹⁾은 본 연구의 5.67 대신에 2.55로 평가하였다. Fig. 4에 도시된 Opiolka et al.⁽³⁾의 실험조건인 18 V와 180 V는 그들이 기술한 10 V/cm, 100 V/cm로부터 본 E_{ef} 공식을 이용하여 각각 유도되었다.

먼저 근사모델식 (8)의 계산결과들을 살펴보면 0 V의 경우에서는 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 연구에서처럼 확산과 중력침강이 모두 중요한 약 0.2~0.3 μm 근처 입경영역에서 층류유동에 대한 수치해석결과보다 약간 과소예측하기는 하나 100 V와 1 kV의 경우에는 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 0 V의 웨이퍼전위에서는 웨이퍼상부표면상의 경계층내에서 중력침강에 의한 입자의 대류유속으로 인하여 효율적으로 증가되는 확산성분의 보상 없이 중력침강과 독립적으로 유도된 식 (8)의 확산에 의한 침착속도모델 V_{dif} 의 적용으로 인하여 그러한 증가된 확산성분의 보상이 없었기 때문이다. 물론 이러한 과소예측이 식 (8)에서의 이미지력의 미고려에 기인한 것은 아니다. 이는 Fig. 2에서 관찰할 수 있는 것처럼 이미지력에 의한 입자속도수준은 Fig. 4의 침착속도수준보다 적어도 1개의 정도(order) 이상의 차이가 있기 때문이다. 100 V와 1 kV에서는 입자의 대류항에 기여하는 쿨롱력이 입자침착을 완전히 지배하기 때문이다.

0 V의 실험결과와의 비교는 상당한 일치로 나타

나고 있다. Opiolka et al.⁽³⁾의 0 V의 경우 $0.08 \mu\text{m} \sim 0.2 \mu\text{m}$ 의 실험치가 다소 낮은 것은 유경훈 등⁽⁶⁾에서 논의된 것처럼 그들의 실험이 넓은 작업대의 중앙정체점에서 이루어 졌기 때문에 확산의 영향을 적게 받았기 때문이다. 한편 Opiolka et al.⁽³⁾의 18 V와 180 V의 실험값들이 각각 0 V와 100 V, 1 kV의 침착속도곡선들 사이에서 수치해석결과들의 입자크기별 변화경향과 상당히 잘 일치되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 주위온도보다 각각 5 K와 10 K만큼 가열되는 경우에 대해 열영동력과 정전기력의 복합된 효과가 입자침착속도에 미치는 영향들을 도시하고 있다. 먼저 대기온도보다 5 K만큼 가열되는 Fig. 5의 경우를 살펴보면 0 V인 경우에 존재하는 deposition free zone(침착속도가 10^{-5} cm/s 보다 작은 입자크기영역)이 웨이퍼의 전위가 증가됨에 따라 점점 축소되어 100 V의 경우에는 완전히 사라지고 1 kV의 경우가 되면 가열되지 않은 경우인 Fig. 4의 침착속도곡선을 완전히 회복하였음을 알 수 있다. 10 K만큼 가열된 웨이퍼의 경우인 Fig. 6에서 0 V와 100 V의 경우를 살펴보면 쿨롱력에 의한 입자침착증가경향이 다소 억제되어졌음이 관찰되나 1 kV의 웨이퍼 전위에서는 마찬가지로 비가열된 경우의 침착곡선과 거의 동일함을 알 수 있다. 따라서 10 K만큼의 가열정도가 1 kV의 웨이퍼 전위에 의한 쿨롱력의 영향에는 거의 효과를 발휘할 수 없음을 알 수 있다. 또한, 10 K의 웨이퍼 가열은 임계입자크기가 $0.075 \mu\text{m}$ 인 4 M DRAM과 $0.05 \mu\text{m}$ 인 16 M DRAM 등의 기존 디바이스들과 $0.035 \mu\text{m}$ 와 $0.025 \mu\text{m}$ 인 차세대 디바이스들에 대해서 어떠한 웨이퍼 전위도 비가열 무정전 웨이퍼의 경우인 Fig. 4의 0 V의 침착곡선 이하로 제어할 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6에는 본 연구의 수치해석결과 외에 식(8)의 예측모델의 계산결과와 Ye et al.⁽²⁾ Opiolka et al.⁽³⁾의 실험결과가 비교를 위하여 함께 도시되어 있다. 먼저 예측모델의 결과는 모든 경우 종류의 계산결과와 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편, 실험결과와 수치해석결과와의 비교에서는 Fig. 5의 5 K의 가열의 경우를 살펴보면 Opiolka et al.⁽³⁾의 18 V와 180 V의 실험값들이 0 V와 100 V, 100 V와 1 kV의 침착속도곡선들 사이에 각각 위치하며 그 변화경향이 침착곡선들과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 0 V의 실험값에서의

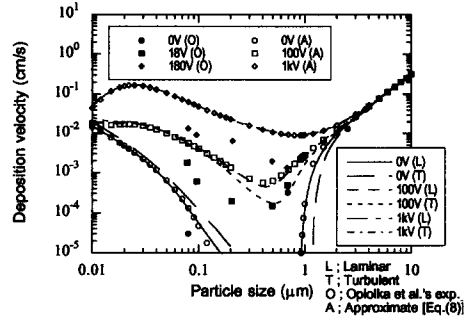


Fig. 5 Variation of the averaged upper deposition velocities with respect to particle size for the heated wafer with $\Delta T=5\text{K}$

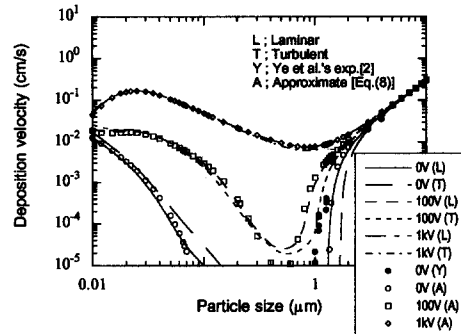


Fig. 6 Variation of the averaged upper deposition velocities with respect to particle size for the heated wafer with $\Delta T=10\text{K}$

차이는 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾이 관찰했던 것처럼 Opiolka et al. (3)의 실험조건인 확산 및 열영동력의 영향을 적게 받는 정체점 상황에 기인한 것이다. 10 K의 웨이퍼 가열의 경우인 Fig. 6에서는 수치해석결과가 Ye et al.⁽²⁾의 실험치를 다소 과소 예측하고 있는데 이는 Oh et al.⁽⁷⁾이 관찰했던 것처럼 Ye et al.⁽²⁾의 실험이 본 연구의 자유로운 수평 웨이퍼의 경우에 비해 큰 차폐효과(blockage effect)와 짧은 출구경계를 가진 챔버속에서 수행되었기 때문에 상부표면상의 경계층이 본 연구의 수평웨이퍼의 경우보다 더 두껍다는 사실에 기인한 것이다.

3.2 국소 입자침착속도

Fig. 7은 가열되지 않은 웨이퍼 상부면상의 국소 침착속도에 대한 정전기력의 효과를 보여주고 있다. 하전되지 않은 웨이퍼의 국소침착속도분포는 명현국 등,⁽²²⁾ 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾의 연구에서

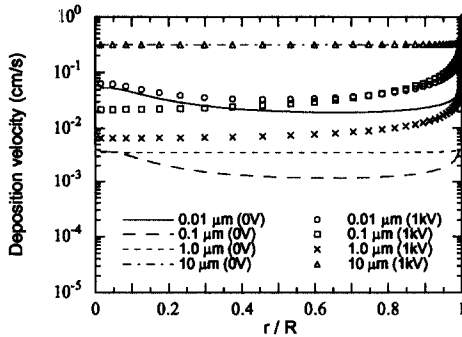


Fig. 7 Variation of the local upper deposition velocity profiles for the unheated wafer with $\Phi_w = 0$ and 1kV under the turbulent flow field

관찰했던 바와 같이 확산이 침착을 지배하는 $0.1 \mu\text{m}$ 이하 입자크기영역에서는 중심부에서의 침착속도가 가장자리와 같고 비길만 하고 중력이 침착을 지배하는 $1.0 \mu\text{m}$ 이상 입자크기영역에서는 웨이퍼 상부면상의 위치에 상관없이 일정한 침착속도분포를 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한, 그들의 연구에서 얻어진 침착속도와 차이가 전혀 없기 때문에 본 연구에서 추가적으로 고려된 이미지력의 영향은 앞서 언급한 대로 무시할 수 있다고 말할 수 있다. 한편, 웨이퍼가 1 kV 만큼 하전되어지면 하전되지 않은 경우보다 모든 침착곡선이 증가된 방향으로 크게 달라짐을 알 수 있다. 가장 두드러진 경향은 웨이퍼 가장자리에서의 현저한 증가라고 말할 수 있다. 이는 Fig. 3의 웨이퍼 상부면상의 전압분포에서 관찰한 바와 같이 가장자리에서의 벽면 전기장강도가 가장 강하기 때문이다. 따라서 확산과 정전력이 모두 지배적인 $0.01 \mu\text{m}$ 의 경우에는 여전히 가장자리에서 중심부로 갈수록 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이지만 정전력이 침착을 완전히 지배하는 $0.1 \mu\text{m}$ 와 $1.0 \mu\text{m}$ 의 경우에는 Fig. 3의 전압분포에서 관찰되는 경향을 그대로 보여주어서 가장자리에서 가장높은 침착속도분포를 나타내고 있다. 그러나, $10 \mu\text{m}$ 의 경우에는 하전되지 않은 경우와 아무런 변화를 관찰할 수 없기 때문에 중력이 여전히 입자침착을 지배하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 1 kV로 하전된 웨이퍼 상부면상의 침착속도가 있어 열영동력의 침착감소효과를 보여주고 있다. $\Delta T = 10 \text{ K}$ 에 의한 열영동력의 침착억제력은 $1.0 \mu\text{m}$ 의 경우에서만 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있고 확산과 정전력이 모두 지배적인

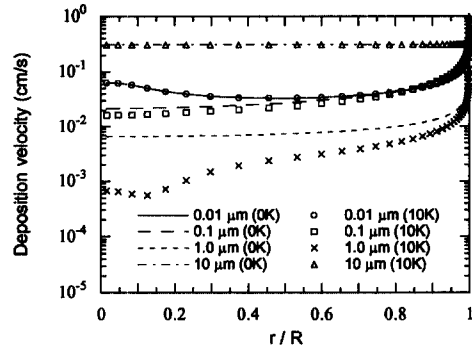


Fig. 8 Variation of the local upper deposition velocity profiles for the 1kV-charged wafer with $\Delta T = 0$ and 10K under the turbulent flow field

$0.01 \mu\text{m}$ 의 경우에는 아무런 영향이 없음을 알 수 있다. $10 \mu\text{m}$ 의 경우에는 중력이 여전히 침착을 지배하고 있음을 알 수 있다.

3.3 침착속도 근사모델

본 이론해석모델은 엄밀한 해석결과를 얻기 위하여 수평웨이퍼 주위의 복잡한 유동장, 온도장, 정전장, 농도장을 풀어야 하기 때문에 현상에서의 신속한 사용을 위해서는 간단하면서도 정확한 근사모델이 필요하다. 지금까지의 수평웨이퍼 침착속도 근사모델과 관련된 내용은 유경훈 등,⁽⁶⁾ Oh et al.⁽⁷⁾에 요약되어있다. 본 연구에서 제안된 근사모델인 식 (8)은 이미 3.1절에서 본 연구의 수치해석결과들을 잘 예측함이 확인되었다. 정전효과가 고려된 실험결과와는 앞서 3.1절에서 논의한 본 연구와 동일한 웨이퍼가 넓은 작업대의 중앙 정체점에 놓인 경우에 해당하는 Opiolka et al.⁽³⁾의 실험이다. 그들의 실험에 사용된 에어로졸입자는 전기중화기 (electrical neutralizer)를 통과한 PSL 입자였다. 일반적으로 중화기를 통과한 에어로졸입자들은 Fuchs^(23,24)의 이극성 전하분포 (bipolar charge distribution)를 따르는 것으로 알려져 있다.⁽²⁵⁾ Opiolka et al.⁽³⁾의 실험과 본 연구의 근사모델식 (8)과의 비교를 위하여 입자전하 q_p 는 식 (6a)의 입자부분을 f 를 Fuchs 이론으로 계산하고 웨이퍼는 자신보다 4배의 지름을 가진 원형 작업대의 중앙정체점에 놓여진 것으로 간주한 유경훈 등⁽⁶⁾과 Oh et al.⁽⁷⁾의 침착속도성분들이 도입되었다. 근사모델의 계산결과와 Opiolka et al.의 실험결과들이 Fig. 9에 함께 도시되어있다. 계산결과들이 실험결과들과 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

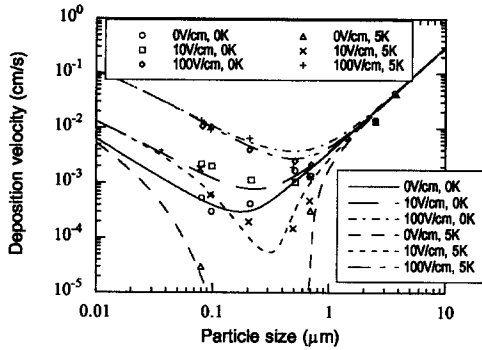


Fig. 9 Comparison of the results of the present approximate model with the experimental data of Opiolka et al. [3] (Fuchs theory)

한편, Fuchs 이론에 의한 이극성 전하분포를 띤 입자 에어로졸들은 Fig. 4에서 관찰한 불쓰만 전하분포의 경우와 같이 입자크기가 감소함에 따른 약 $0.025 \mu\text{m}$ 이하의 입자크기영역에서의 침착속도 감소현상을 보여주지는 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 Fuchs 전하분포가 이러한 입자크기영역에서 불쓰만 분포의 입자전하분포보다 상당히 높기 때문이다.

4. 결 론

일반적인 경우의 클린룸 환경하에서 불쓰만평형 전하분포를 가진 입자에 대해 열영동력과 정전기력이 전기적으로 하전된 가열 수평웨이퍼로의 입자침착에 미치는 복합적인 효과를 수치해석을 통하여 고찰하고 이로부터 다음과 같은 사항들이 관찰되었다.

(1) 본 연구의 정전기력과 열영동력이 고려된 수평웨이퍼상의 입자침착에 대한 수치해석방법은 기존의 이론적, 실험적 연구결과들과의 비교로부터 타당한 결과를 제시해줌이 확인되었다.

(2) 가열되지 않는 웨이퍼의 경우에 웨이퍼가 100 V 이상으로 하전되어지면 대폭적인 입자침착의 증가가 발생되며 이때 쿨롱력이 입자침착을 완전히 지배한다.

(3) 웨이퍼가 주위온도보다 10 K 만큼 가열되더라도 1 kV의 웨이퍼전위에 의한 쿨롱력의 침착 증가효과를 압도할 수는 없다.

(4) 1 kV의 웨이퍼전위의 경우에 서브마이크론 입경영역에서는 약 $0.025 \mu\text{m}$ 에서 입자침착의 최대 피크치를 보이며 이는 차세대 반도체칩의 생산에

있어 상당한 제품수율 저하를 초래할 것으로 판단된다.

(5) 정전력이 침착을 지배할 경우 웨이퍼 상부표면상의 침착속도는 가장자리에서 가장 높고 중심부로 갈수록 감소되는 경향을 보인다.

(6) 본 연구에서 제안한 쿨롱력이 고려된 입자침착속도 근사모델(식 (8))은 웨이퍼 배치형상에 따른 적절한 확산침착속도성분이 도입되면 수치해석 계산결과와 기존의 실험결과와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

(7) Fuchs 이론에 의한 입자전하분포를 가진 에어로졸은 불쓰만 전하분포의 경우와 같은 약 $0.025 \mu\text{m}$ 이하의 입자크기영역에서 침착속도의 감소현상이 이론적으로 관찰되지는 않는다.

참고문헌

- (1) Abuzeid, S., 1994, "Minienvironment Based IC Facilities for Future Generation Devices," *Proc. of the 12th International Symposium on Contamination Control*, Yokohama, Japan, pp. 509~514.
- (2) Ye, Y., Pui, D. Y. H., Liu, D. 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*, Vol. 22, pp. 63~72.
- (3) Opiolka, S., Schmidt, F. and Fissan, H., 1994, "Combined Effects of Electrophoresis and Thermophoresis on Particle Deposition onto Flat Surfaces," *J. Aerosol Science*, Vol. 25, pp. 665~671.
- (4) 배귀남, 박승오, 이춘식, 안이기, 1994, "열영동력이 수평웨이퍼상의 입자침착에 미치는 영향," 대한기계학회논문집, 제18권, 제1호, pp. 175~183.
- (5) Opiolka, S., Fissan, H., Ye, Y. and Pui, D. Y. H., 1990, "Reduction of Particle Deposition on a Free-Standing Semiconductor Wafer by Thermophoretic Effect," *Proc. of the 10th International Symposium on Contamination Control, Zurich, Switzerland, in Swiss Contamination Control*, Vol. 3, No. 4a, pp. 85~88.
- (6) 유경훈, 오명도, 명현국, 1995, "가열 또는 냉각되는 수평웨이퍼 표면으로의 입자침착에 관한

- 해석," 대한기계학회 논문집, 제19권, 제5호, pp. 1319~1332.
- (7) Oh, M. D., Yoo, K. H. and Myong, H. K., 1996, "Numerical Analysis of Particle Deposition onto Horizontal Freestanding Wafer Surfaces Heated or Cooled," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 25, pp. 141~156.
- (8) Wilson, R., 1987, "Nuclear Air Ionization for Contamination Control," *Proc. of the 33rd IES Annual Technical Meeting*, Mt. Prospect, Illinois, pp. 466~472.
- (9) Sakada, 1988, "Aerosol Deposition on Wafer Surface," *Proc. of the 9th International Symposium on Contamination Control*, pp. 65~72.
- (10) Launder, B. E. and Sharma, B. I., 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disk," *Lett. Heat Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 131~138.
- (11) Johansen, S. T., 1991, "The Deposition of Particles on Vertical Walls," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 17, pp. 355~376.
- (12) Abuzeid, S., Busnaina, A. A. and Ahmadi, G., 1990, "Numerical Simulations of Particle Deposition from a Point Source in Turbulent Flow," *Proc. of the 36th IES Annual Technical Meeting*, pp. 295~302.
- (13) Liu, B. Y. H. and Pui, D. Y. H., 1974, "Equilibrium Bipolar Charge Distribution of Aerosols," *J. Colloid Interface Science*, Vol. 49, pp. 305~312.
- (14) Liu, B. Y. H., Pui, D. Y. H., Rubow, K. L. and Szymanski, W. W., 1985, "Electrostatic Effects in Aerosol Sampling and Filtration," *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 29, pp. 251~269.
- (15) Pui, D. Y. H., Tsai, C. -J. and Liu, B. Y. H., 1988, "Charge Level on Aerosol Particles : Measurement of Particle Charge and Size Distribution in Disk Drive," *Proc. of the 34th IES Annual Technical Meeting*, pp. 395~399.
- (16) Cooper, D. W., Peters, M. H. and Miller, R. J., 1989, "Predicted Deposition of Submicrometer Particles Due to Diffusion and Electrostatics in Viscous Axisymmetric Stagnation-Point Flow," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 11, pp. 133~143.
- (17) Stratmann, F. and Whitby, E. R., 1989, "Numerical Solution of Aerosol Dynamics for Simultaneous Convection, Diffusion and External Forces," *J. Aerosol Science*, Vol. 20, pp. 437~440.
- (18) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York.
- (19) Li, A. and Ahmadi, G., 1993, "Aerosol Particle Deposition with Electrostatic Attraction in a Turbulent Channel Flow," *J. Colloid and Interface Science*, Vol. 158, pp. 476~482.
- (20) Fan, F. -G. and Ahmadi, G., 1994, "On the Sublayer Model for Turbulent Deposition of Aerosol Particles in the Presence of Gravity and Electric Fields," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 21, pp. 49~71.
- (21) 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 μm ," *J. Aerosol Science*, Vol. 20, pp. 787~796.
- (22) 명현국, 박은성, 1993, "웨이퍼 표면상의 입자침착에 관한 수치시뮬레이션," 대한기계학회논문집, 제17권, 제9호, pp. 2315~2328.
- (23) Fuchs, N. A., 1963, "On the Stationary Charge Distribution on Aerosol Particles in a Bipolar Ionic Atmosphere," *Geofis. Pura Appl.*, Vol. 56, pp. 185~193.
- (24) Wiedensohler, A., 1988, "An Approximation of the Bipolar Charge Distribution for Particles in the Submicron Size Range," *J. Aerosol Science*, Vol. 19, pp. 387~389.
- (25) Wiedensohler, A., Lutkemeier, M., Feldpausch, M. and Helsper, C., 1986, "Investigation of the Bipolar Charge Distribution at Various Gas Conditions," *J. Aerosol Science*, Vol. 17, pp. 413~416.