

## 반도체 제조용 사일렌 플라즈마 반응기 내에서의 입자 오염에 관한 이론적 연구

김동주 · 김교선

강원대학교 공과대학 화학공학과  
(1999년 2월 24일 접수)

### Theoretical study on the particle contamination in silane plasma reactor for semiconductor processing

Dong-Joo Kim and Kyo-Seon Kim

Department of Chemical Engineering, College of Engineering,  
Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

(Received February 24, 1999)

**요 약** - 반도체 제조 공정 중 플라즈마 반응기 내에서 입자 오염을 유발하는 입자들의 거동과 성장을 모델식을 사용하여 이론적으로 고찰하였다. 플라즈마 반응기 내에서 입자 거동에 영향을 미치는 힘들로 유체 대류, 입자 확산 및 외부힘 (ion drag force, electrostatic force, 중력) 등을 고려하였다. 플라즈마 벌크 영역에서 전하를 가진 입자들간의 충돌에 의한 입자 성장을 고려하기 위해 모델식에 입자 전하 분포를 고려하였다. 대부분의 입자들은 ion drag force와 electrostatic force가 균형을 이루고 있는 두 sheath 경계 영역에 존재하였으며 두 sheath 영역과 벌크 플라즈마에서의 입자 농도는 0에 접근하였다. 시간이 지남에 따라 입자 충돌로 인한 입자들의 크기는 증가하였으며 입자가 성장함에 따라 입자 표면적의 증가와 더불어 입자가 가지는 평균 전하량도 증가하였다.

**Abstract** - We developed the model equations to investigate the particle movement and growth theoretically in *a*-Si plasma CVD reactor, where those particles act as the source of contamination. We included the effects of fluid convection, particle diffusion and external forces (ion drag force, electrostatic force and gravitational force) onto the particles to analyze the movements of particles in plasma reactor. Taking into account the particle charge distribution, the particle growth by coagulation between the charged particles was investigated. Most of those particles are located in the region near the sheath boundaries by the balance between the ion drag and electrostatic forces. The particle concentrations in the sheath region and in the bulk plasma region are almost zero. The sizes of the predator particles increase with time by the coagulation with protoparticles and, as a result, the surface area and the average charge of predator particles also increase with time.

### 1. 서 론

반도체 공정 중 박막 제조를 위한 *a*-Si PCVD 반응기에서는 나노에서 미크론 크기를 가지는 입자들이 생성되어 플라즈마 반응기를 오염시키고 있으며 반도체 소자 및 반응기 효율성 등을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 대부분의 입자들은 플라즈마 반응기 내에서 음으로 대전되어 있으며 반응기 내에 작용하는 여러 힘들간의 균형에 의해 주로 sheath 경계 영역에 머무르는 것

으로 알려져 있다 [1-9]. 플라즈마 반응기 내에서 효과적인 입자 제거를 위해 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장과 반응기 전달 현상 등을 고려한 체계적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 수치 모사를 통해 사일렌 PCVD 반응기 내에서 입자 성장과 거동을 고찰하였다. 반응기 내에서 입자 거동을 분석하기 위해 반응기 내 압력과 전체 기체 유량 및 전기장의 세기 등의 공정 변수를 변화시켜가며 입자 거동 및 전달현상 등을 고찰하였다.

벌크 플라즈마 영역에서 입자 성장을 분석하기 위한 모델식에는 입자가 성장함에 따라 입자들의 전하 분포가 계산될 수 있도록 하였으며 공정 변수로서 초기입자 크기 및 성장 속도, 거대입자 농도 등을 변화시켜 가며 플라즈마 반응기에서 입자 성장을 이론적으로 고찰하였다.

본 연구에서는 입자 거동을 위한 모델식을 사용하여 공정 변수 변화에 따른 입자 거동에 플라즈마 반응기 내에서 존재하는 힘들이 미치는 영향을 정성적으로 분석하고자 하였다. 또한 벌크 플라즈마 영역에서 입자가 성장함에 따른 입자들의 전하분포를 계산하였으며 입자 충돌에 입자 전하를 고려한 입자 성장 속도를 계산하고자 하였다.

## 2. 이 론

플라즈마 반응기 내에서 입자 성장과 거동을 모델화하기 위해 사일렌 플라즈마 CVD에서 생성된 입자들을 효과적으로 관찰할 수 있도록 Watanabe에 의해 제안된 반응기를 사용하였다 [2]. 플라즈마 반응기 내 두 전극은 많은 기공을 가지고 있어 두 전극간의 유체의 흐름은 plug flow가 되며 계산 시간은 현저하게 감소하였다.

### 2.1. 입자 거동을 위한 모델식

사일렌 플라즈마 반응기 내에서의 입자 거동을 고찰하기 위해 일반적으로 전달 현상을 근거로 하고 비교적 계산 시간이 적게 드는 fluid approach 방법을 사용하였다.

반응기 내 유체의 흐름은 일정하다는 가정 하에 입자 거동에 대한 모델식을 사용하여 비정상 상태에서 입자에 대한 농도( $n_p$ )를 계산하였으며 사용한 모델식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial n_p}{\partial t}\right) = -\nabla \cdot (u_{n_p} - D_p \nabla n_p - u_{p,ext} n_p) \quad (1)$$

식 (1)에서 오른쪽 첫 번째 항은 유체 대류의 영향을 나타내며 두 번째 항은 입자 확산의 영향을 나타낸다. 세 번째 항은 외부힘에 의한 영향을 나타내며 식 (2)에서와 같이 외부힘은 ion drag force(I.D.F.)와 electrostatic force(E.F.) 및 중력(G.F.) 등의 합으로 표현된다 [4, 6].

$$u_{p,ext} = \frac{1}{f_p} [(I.D.F.) + (E.F.) + (G.F.)] \quad (2)$$

플라즈마 반응기 내에서의 전기장의 세기는 저압 플라즈마에 적용될 수 있는 Child-Langmuir 식을 사용하여 계산하였다. 두 sheath 영역에서의 전기장의 세기는 각각 식 (3)과 (5)와 같이 표현되며 벌크 영역에서는 식 (4)에서와 같이 0이 된다 [4-6].

$$E = E_{max} \left[ 1 - \left( \frac{x}{x_{pos}} \right)^{1/3} \right] \quad \text{for } 0 \leq x \leq x_{pos} \quad (3)$$

$$E = 0 \quad \text{for } x_{pos} \leq x \leq x_{neg} \quad (4)$$

$$E = E_{min} \left[ 1 - \left( \frac{x_{end} - x}{x_{end} - x_{neg}} \right)^{1/3} \right] \quad \text{for } x_{neg} \leq x \leq x_{end} \quad (5)$$

사일렌 플라즈마 CVD에는 50여 개 이상의 화학종과 200여 개 이상의 화학반응식이 존재하는 것으로 알려져 있으며 본 연구에서는 플라즈마 반응기 내에서 ion drag force에 주로 영향을 미치는 이온들과 이온들 생성과 소멸에 관련된 화학 반응식들만을 고려하였으며 [4, 5] 화학종들의 농도는 정상 상태에서 계산된 값을 활용하였다 [5].

입자 거동에 대한 모델식을 x방향으로는 유한차분법을 적용하고 y에 대해서는 'method of lines'를 적용하여 상미분 방정식으로 변환한 후 DGEAR subroutine을 이용하여 비정상 상태에서 풀었다.

### 2.2. 입자 성장을 위한 모델식

플라즈마 반응기 내에서 성장한 거대입자들은 1-10 nm 크기의 작은 초기입자들로 구성되어 있으며 입자가 성장하는 동안 거대입자들과 초기입자들의 농도는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다 [1, 2].

플라즈마 반응기 내에서 충돌에 의한 입자 성장을 분석하기 위해서는 초기입자들과 거대입자들의 전하 분포를 고려하여야 하며 벌크 플라즈마 영역에서 입자들의 전하분포는 Gaussian 형태로 표현된다 [7]. 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장을 위한 충돌 과정 중 같은 전하를 가진 입자들간의 충돌은 무시하였다.

본 연구에서는 벌크 플라즈마 영역에서 거대입자들은 초기입자들과의 충돌에 의해 성장하며 입도 분포가 단분산인 실험 결과들 [1, 2]을 근거로 하여 Lemons 등 [8]이 제안한 모델식을 수정한 후 거대입자들에 대한

입자 성장 속도식으로 사용하였다.

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \left( \frac{2}{\pi d_p^2 \rho_d} \right) [f_{p, neu} f_{0, neu} + f_{p, neu} f_{0, neg} + f_{p, neu} f_{0, pos} + f_{p, neg} f_{0, neu} + f_{p, neg} f_{0, pos} (1 - \Gamma) + f_{p, pos} f_{0, neu} + f_{p, pos} f_{0, neg} (1 - \Gamma)] \beta \rho(t) \quad (6)$$

$$\rho(t) = [\rho_0' t + n_p m_0 - n_p m_0 (d_p/d_0)^3] \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{\bar{q}_{p, neg \text{ or } pos} \bar{q}_{0, pos \text{ or } neg} e^2}{\pi \epsilon_0 m_R v_R^2 (d_p + d_0)} \quad (8)$$

식 (6)에서  $(1-\Gamma)$ 는 반대전하를 가지는 입자들이 충돌할 경우 두 입자간에 작용하는 Coulomb force에 의한 입자 충돌의 enhancement factor를 나타낸다 [9].

입자가 성장함에 따라 벌크 플라즈마 영역에서의 플라즈마 조건은 변화하게 되므로 벌크 플라즈마 영역에서 전기적인 중성 조건을 만족시키기 위한 charge balance 식은 다음과 같다.

$$n_+ = n_- + n_e - n_p \bar{q}_p - n_0 \bar{q}_0 \quad (9)$$

플라즈마 조건 변화에 따른 거대입자 크기, 초기입자 농도 및 입자들의 전하 분포 등을 계산하기 위해 식 (6)을 상미분 방정식 solver인 DGEAR subroutine를 사용하여 풀었다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 입자 거동

사일렌 플라즈마 반응기 내에서 입자 거동을 고찰하기 위해 사용한 기준 조건으로 전체 기체 유량은 25 cm<sup>3</sup>/min, 반응기 내 압력은 0.1 Torr, 두 전극에서 전기장의 세기( $E_{pos}$ ,  $E_{neg}$ )는  $\pm 100$  V/cm로 하였다. 공정 변수 변화에 따른 사일렌 플라즈마 반응기 내에서 입자 거동을 고찰하기 위해 전체 기체 유량은 10~100 cm<sup>3</sup>/min, 전기장의 세기는  $\pm 30$ ~100 V/cm로 변화시켰다.

그림 1은 기준 조건하에서 시간 변화에 따른 입자 농도 분포를 두 전극간의 거리에 따라 나타낸 것이다. 초기에는 플라즈마 반응기 전체에 걸쳐 입자 농도가  $1 \times 10^8$  cm<sup>-3</sup>으로 일정하였는데 시간이 지남에 따라 두 sheath 영역에 있는 입자들은 두 전극에서의 전기적인 반발력에 의한 electrostatic force에 의해 두 sheath 영역에 있는 입자들이 벌크 플라즈마 쪽으로 이동하게

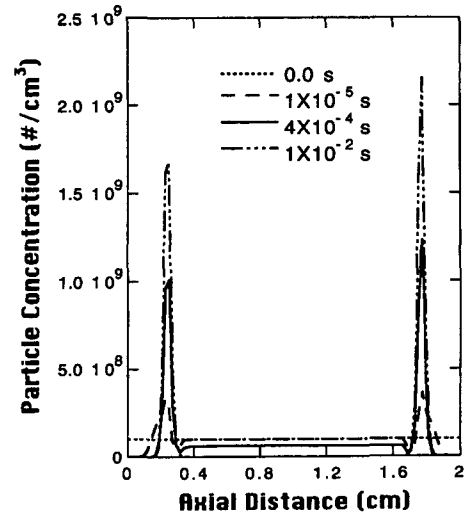


그림 1. The concentration profiles of uniform sized particles ( $d_p = 0.1 \mu\text{m}$ ) in plasma reactor for various times ( $Q = 25 \text{ sccm}$ ,  $E_{\text{max}} \& -E_{\text{min}} = 100 \text{ V/cm}$ ,  $P = 0.1 \text{ Torr}$ ).

되므로 두 sheath 영역에 있는 입자들의 농도가 감소하여 0에 접근하고 있는 것을 보여주고 있다. 시간이 지남에 따라 반응기 중앙에 있었던 입자들은 두 전극 방향으로 작용하는 ion drag force에 의해 두 전극 쪽으로 이동하게 되어 반응기 중앙에서 입자 농도가 감소하고 있고 0.01s에서 입자의 농도는 0에 접근하고 있는 것을 보여주고 있다. 정상 상태( $t = 0.01 \text{ s}$ )에 도달하였을 때는 대부분의 입자들이 전기적 반발력과 ion drag force가 균형을 이루고 있는 두 sheath 경계 영역에 존재하고 있는 것을 보여주고 있으며 Selwyn과 Patterson [11]도 산업용 플라즈마 반응기 내에서 대부분의 입자들이 두 sheath 경계 영역에 존재하고 있음을 보고한 바 있다.

그림 2는 0.01 s에서 전체 기체 유량을 10 cm<sup>3</sup>/min, 100 cm<sup>3</sup>/min으로 하였을 때 유량 변화에 따른 입자들의 농도 분포를 두 전극간의 거리에 따라 나타낸 것이다. 반응기 중앙에서 두 전극방향으로 작용하는 ion drag force와 두 전극에서 반응기 중앙 쪽으로 작용하는 electrostatic force에 의해 반응기 중앙과 두 sheath 영역에서의 입자들의 농도는 0에 접근하고 있으며 대부분의 입자들이 전기적 반발력과 ion drag force가 균형을 이루고 있는 두 sheath 경계 영역에 존재하고 있는 것을 보여주고 있다. 유량이 증가함에 따라 유체가 흐르는 방향으로 입자들이 더 많이 밀려가게

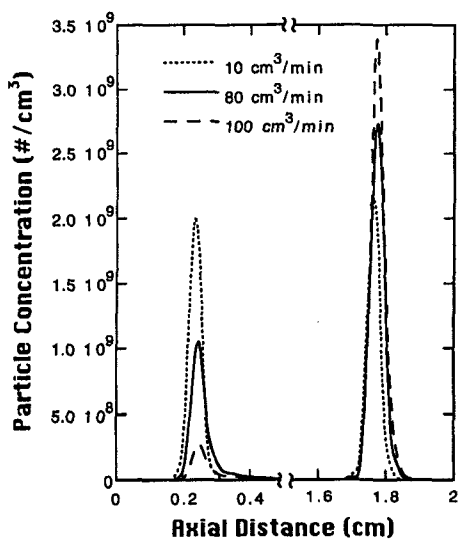


그림 2. The concentration profiles of uniform sized particles ( $d_p = 0.1 \mu\text{m}$ ) in plasma reactor for various total gas flow rates ( $E_{\text{max}}$  &  $-E_{\text{min}} = 100 \text{ V/cm}$ ,  $P = 0.1 \text{ Torr}$ ,  $t = 0.01 \text{ s}$ ).

되므로 상류 sheath 경계에서의 입자 농도는 감소하고 있고 하류 sheath 경계에서의 입자 농도는 증가하고 있는 것을 보여주고 있다.

그림 3은 전기장의 세기를  $\pm 30 \text{ V/cm}$ ,  $\pm 100 \text{ V/cm}$ 로 변화시켰을 때 0.01s에서 입자들의 농도 분포를 두 전극간의 거리에 따라 나타낸 것이다. 대부분의 입자들

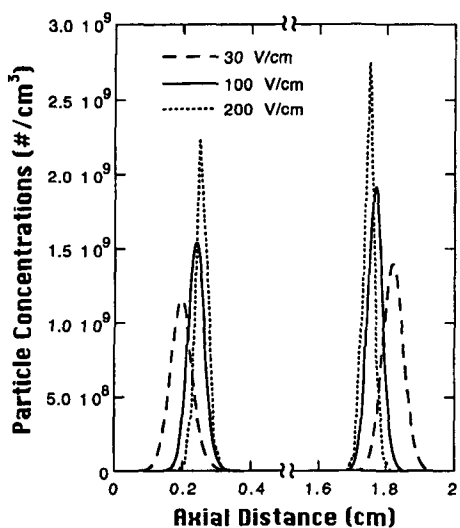


그림 3. The concentration profiles of uniform sized particles ( $d_p = 0.1 \mu\text{m}$ ) in plasma reactor for various electric field strengths ( $Q = 25 \text{ sccm}$ ,  $P = 0.1 \text{ Torr}$ ,  $t = 0.01 \text{ s}$ ).

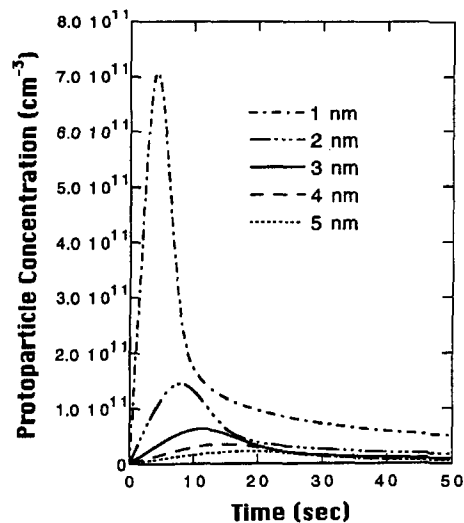


그림 4. The changes of protoparticle concentrations for various protoparticle diameters as a function of time ( $n_p = 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho_o' = 2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ ).

은 두 sheath 경계 영역에 분포하고 있고 반응기 중앙과 두 sheath 영역에서 입자들의 농도는 0에 접근하고 있는 것을 보여 주고 있다. 유체 대류의 영향으로 하류 sheath 경계 영역에서의 입자 농도가 상류 sheath 경계 영역에서의 입자 농도보다 높게 나타나고 있다. 전기장의 세기가 증가함에 따라 두 전극에서의 전기적 반발력은 증가하게 되어 두 sheath 영역에 있는 입자들이 반응기 중앙 쪽으로 더 많이 밀리게 되므로 두 sheath 경계 영역에서의 입자 농도가 증가하고 있는 것을 보여 주고 있다. 전기장의 세기의 증가에 따른 전기적 반발력의 증가로 대부분의 입자들이 존재하게 되는 두 sheath 경계 영역의 위치는 반응기 중앙 쪽으로 이동하고 있는 것을 보여 주고 있다.

### 3.2. 입자 성장

벌크 플라즈마 영역에서 입자 성장을 이론적으로 분석하기 위한 플라즈마 조건으로 양이온 농도는  $2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 음이온 농도는  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e$ 는 2 eV,  $T_i$ 는 500 K로 하였으며 초기입자 생성 속도가  $2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ , 거대입자 농도가  $6.0 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ , 초기입자 크기가 2 nm일 때를 기준 조건으로 하여 초기입자 크기 변화가 입자 성장에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 4에서는 기준 조건하에서 초기입자 크기 변화에 따른 초기입자들의 농도 변화를 시간에 따라 나타낸 것

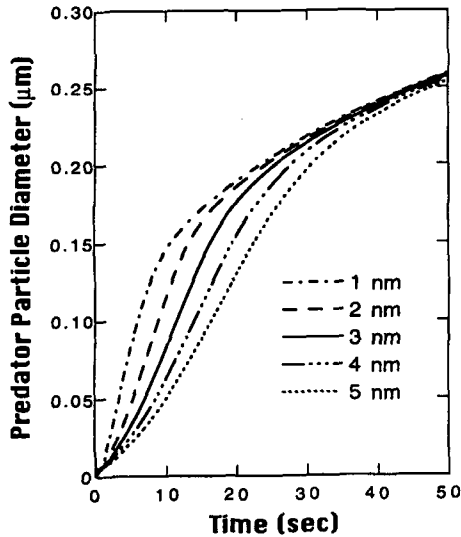


그림 5. The changes of predator particle diameters for various protoparticle diameters as a function of time ( $n_p = 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho_0' = 2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ ).

이다. 입자 성장 초기에는 아직 거대입자 크기가 작아 입자 충돌로 인한 초기입자들의 소모 속도보다 생성 속도가 더 커 초기입자 농도가 높게 나타나고 있으나 거대입자가 성장함에 따라 거대입자들의 응집 속도는 증가하게 되어 거대입자와의 충돌로 인한 초기입자 소모 속도가 생성 속도보다 크게 되므로 초기 입자 농도가 감소하고 있는 것을 보여주고 있다. 초기입자 크기가 감소함에 따라 초기입자 생성 속도 ( $2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ )는 일정하므로 생성되는 초기입자들의 농도는 증가하고 있는 것을 보여주고 있다.

그림 5는 시간 변화에 따른 거대입자 크기 변화를 초기입자 크기를 변화시켜 가며 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라 생성되는 초기입자들과의 응집으로 거대입자들이 성장하고 있는 것을 보여주고 있다. 입자 성장 초기에는 높은 초기입자 농도로 거대입자들의 응집속도는 증가하게 되어 거대입자들이 빠르게 성장하고 있는 것을 보이고 있으며 초기입자 농도가 최대값에 도달한 후부터는 거대입자들의 응집 속도 증가로 인한 초기입자 농도의 감소로 거대입자들의 성장이 시간이 지남에 따라 둔화되고 있는 것을 보여주고 있다. 초기입자 크기가 감소함에 따라 초기입자들의 농도는 증가하게 되므로 입자들 간의 응집 속도는 증가하게 되어 거대입자들이 빠르게 성장하고 있는 것을 보여 주고 있다. 약 50s 이후부터는 거대입자들의 응집 속도가 충분히 커 초기입자들이 생성

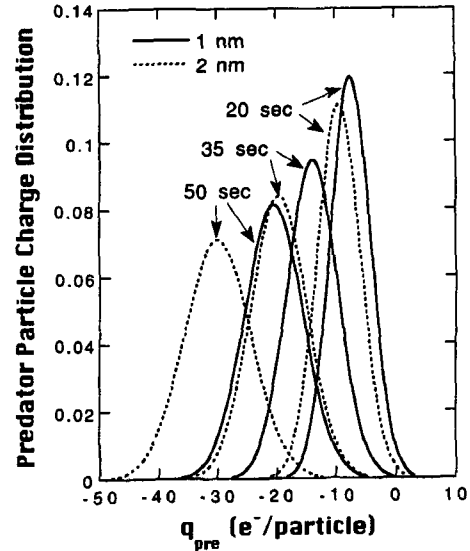


그림 6. The charge distributions of predator particles in plasma reactor for various protoparticle diameters ( $n_p = 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho_0' = 2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ ).

되자마자 거대입자들과의 충돌로 거의 대부분이 소모되어 초기입자들의 크기 변화에 따라 거대입자들의 크기가 큰 변화가 없는 것을 보여주고 있다.

그림 6은 초기입자 크기 변화에 따른 벌크 플라즈마 영역에서의 거대입자들의 전하분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라 거대입자들의 크기는 증가하게 되므로 전자들이 충돌하는 거대입자들의 표면적은 증가하게 되어 거대입자들이 가지는 음전하수는 증가하고 있으며 20s 이후부터 대부분의 거대입자들이 음으로 대전되는 것을 보여주고 있다. 초기입자 크기가 감소함에 따라 초기입자 농도는 증가하게 되고 전기적 중성 조건식 (6)을 만족하기 위한 전자 농도는 감소하게 되므로 거대입자들과 충돌하는 전자들의 양은 감소하게 되어 거대입자들이 가지는 음전하수가 감소하고 있는 것을 보여 주고 있다.

그림 7은 벌크 플라즈마 영역에서 초기입자 크기 변화에 따른 초기입자들의 전하 분포를 시간에 따라 나타낸 것이다. 시간이 지남에 따라 초기입자들의 농도는 감소하게 되고 전기적 중성 조건을 만족하기 위한 전자 농도는 증가하게 되어 전자와의 충돌로 초기입자들이 가지는 평균 전하는 증가하고 있으며 양성 혹은 중성으로 존재하는 초기입자들도 상당량 있음을 보여주고 있다. 초기 입자들의 크기가 증가함에 따라 초기입자들의 농도

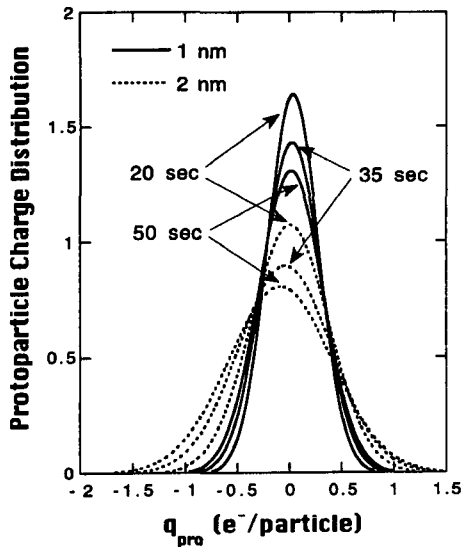


그림 7. The protoparticle charge distributions in plasma reactor for various protoparticle diameters ( $n_p = 6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho_o' = 2.2 \times 10^{-10} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ ).

는 감소하게 되고 전자 농도는 증가하게 되므로 초기입자들이 전자와의 충돌로 가지는 음전하수는 증가하였다.

그림 8은 본 연구의 이론 결과와 Shiratani 등 [1]의 실험 결과를 동일 공정 조건하에서 비교한 것이다. 시간이 지남에 따라 거대입자는 초기입자와의 충돌로 성

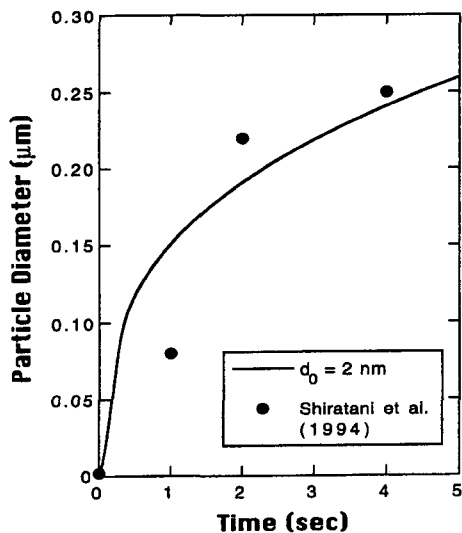


그림 8. The comparison of the predicted predator particle diameter with the experimental results by Shiratani *et al.* (1996) ( $n_p = 6 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ ,  $\rho_o' = 2.2 \times 10^{-7} \text{ g/cm}^3 \text{ s}$ ).

장하고 있으며 본 연구의 이론 결과와 실험 결과가 비교적 잘 맞고 있는 것을 보여 주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사일렌 플라즈마 반응기 내에서 여러 공정 변수들이 입자 거동과 성장에 미치는 영향을 모델 식으로써 고찰하였다. 대부분의 입자들은 두 sheath 경계 영역에 분포하였고 두 전극에서의 전기적인 반발력에 의해 두 sheath 영역에서의 입자 농도는 0에 접근하였다. 유체 대류의 영향으로 유체가 흐르는 방향으로 입자들이 밀리게 되어 하류 sheath 경계 영역에서의 입자 농도가 상류 sheath 경계 영역에서의 입자 농도보다 높게 나타났다. 유량이 증가함에 따라 유체가 흐르는 방향으로 입자들이 더 많이 밀리게 되므로 상류 sheath 경계 영역에서는 입자 농도가 감소하였고 하류 sheath 경계 영역에서는 입자 농도가 증가하였다. 전기장의 세기가 증가함에 따라 두 전극에서의 전기적 반발력의 증가로 두 sheath 영역에 있는 입자들이 반응기 중앙 쪽으로 더 많이 밀리게 되므로 두 sheath 경계 영역에서의 입자 농도가 증가하였고 대부분의 입자들이 존재하게 되는 위치는 더 반응기 중앙 쪽으로 이동하였다.

벌크 플라즈마 영역에서 입자 성장을 모델식을 사용하여 이론적으로 고찰하였으며 입자 성장에 따른 평균 전하의 변화와 전하 분포 등을 수치모사를 통해 얻었다. 시간이 지남에 따라 입자 크기는 계속 증가하였으며 입자 표면적의 증가와 더불어 입자가 가지는 평균 전하량도 증가하였다. 초기입자 크기가 감소함에 따라 초기입자 농도는 증가하게 되어 거대입자 크기는 빠르게 증가하였다. 초기입자 크기가 감소함에 따라 초기입자들의 농도는 증가하게 되고 전기적 중성 조건을 만족하기 위한 전자 농도는 감소하게 되므로 거대입자들과 충돌하게 되는 전자들의 양은 감소하게 되어 거대입자들이 가지는 음전하수가 감소하였으며 전자와의 충돌로 초기입자들이 가지는 음전하수는 감소하였다. 거대입자들은 Gaussian 분포 함수에 의해 벌크 플라즈마 영역에서 모두 음으로 대전되었으며 초기입자들은 플라즈마 조건에 따라 음성, 양성 혹은 중성으로 존재하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체 연구소의 교육부 분야

학술 연구 조성비(과제번호 : 97-E-1029)에 의해 수행되었습니다.

### Nomenclature

$D_p$	입자 확산 계수 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]
$d_0$	초기입자 직경 [ $\text{cm}$ ]
$d_p$	거대입자 직경 [ $\text{cm}$ ]
$E_{\max}, E_{\min}$	두 전극에서의 각각 최대, 최소 전 기장의 세기 [ $\text{V}/\text{cm}$ ]
$e$	단위 전자당 전하량 [ $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ]
$f_p$	입자들에 작용하는 미찰계수 [ $\text{g}/\text{s}$ ]
$f_{p,\text{neu}}, f_{p,\text{neg}}, f_{p,\text{pos}}$	각각 중성, 음성, 양성으로 존재하는 거대입자 비율.
$f_{0,\text{neu}}, f_{0,\text{neg}}, f_{0,\text{pos}}$	각각 중성, 음성, 양성으로 존재하는 초기입자 비율.
$m_0$	초기입자 무게 [ $\text{g}$ ]
$m_R$	충돌하는 두 입자간의 상대 무게
$n_0$	초기입자 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]
$n_e$	전자 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]
$n_p$	거대입자 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]
$n_+$	양이온 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]
$n_-$	음이온 농도 [ $\text{cm}^{-3}$ ]
$P$	반응기 내 압력 [ $\text{Torr}$ ]
$Q$	전체 기체 유량 [ $\text{cm}^3/\text{min}$ ]
$\bar{q}_0$	초기입자들의 평균 음전하수
$\bar{q}_p$	거대입자들의 평균 음전하수
$t$	시간 [ $\text{s}$ ]
$u$	공급기체 유속 [ $\text{cm}/\text{s}$ ]
$u_{p,\text{ext}}$	외부힘에 의해 유발되는 입자속도 [ $\text{cm}/\text{s}$ ]
$v_R$	충돌하는 두 입자간의 상대 속도

### Greek Letters

$\beta$	충돌하는 입자들간의 충돌 빈도 함수 [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
$\Gamma$	전하를 가지고 있는 두 입자들의 접근할 수 있는 최소거리
$\epsilon_0$	진공상태에서의 유전율 [ $8.854 \times 10^{-21} \text{C}^2/\text{dyn}\cdot\text{cm}^2$ ]
$\rho$	초기입자 무게 밀도 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
$\rho_0'$	초기입자 생성 속도 [ $\text{g}/\text{cm}^3\text{s}$ ]
$\rho_d$	입자 밀도 [ $2.0 \text{g}/\text{cm}^3$ ]

### 참고문헌

- [1] M. Shiratani, H. Kawasaki, T. Fukuzawa, T. Yoshioka, Y. Ueda, S. Singh and Y. Watanabe, *J. Appl. Phys.* **79**(1), 104 (1996).
- [2] T. Fukuzawa, K. Obata, H. Kawasaki, M. Shiratani and Y. Watanabe, *J. Appl. Phys.* **80**(6), 1 (1996).
- [3] A. Howling, L. Sansonnens, J.-L. Dorier and Ch. Hollenstein, *J. Appl. Phys.* **75**, 1340 (1994).
- [4] K. S. Kim and M. Ikegawa, *Plasma Sources Sci. Technol.* **5**, 311 (1996).
- [5] D. J. Kim and K. S. Kim, *Japn. J. Appl. Phys.* **36**, 4989 (1997).
- [6] D. J. Kim and K. S. Kim, *Aerosol Sci. & Technol.*, **32**, 293 (2000).
- [7] T. Matsoukas, M. Russell and M. Smith, *J. Vac. Sci. Technol.* **A14**(2), 624 (1996).
- [8] D. S. Lemons, R. K. Keinigs, D. Winske and M. E. Jones, *Appl. Phys. Lett.* **68**(50), 613 (1996).
- [9] M. Horanyi and C. K. Goertz, *The Astrophysical Journal*, **361**, 155 (1990).
- [10] S. K. Friedlander, *Smoke, Dust and Haze* (Wiley-Interscience, New York, 1977).
- [11] G. S. Selwyn and E. F. Patterson, *J. Vac. Sci. Technol.* **A10**, 1053 (1992).