

## 반도체 제조용 사일렌 플라즈마 반응기에서의 입자 성장 모델

김동주 · 김교선\*

강원대학교 공과대학 화학공학과  
(논문접수일 : 2001년 3월 18일)

### Model of Particle Growth in Silane Plasma Reactor for Semiconductor Fabrication

Dong-Joo Kim and Kyo-Seon Kim\*

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

(Received March 18, 2001)

#### 요 약

플라즈마 반응기 내에서 입자 전하 분포가 Gaussian 형태로 표현될 때 전하 분포를 가지는 입자들의 충돌에 의한 입자 성장을 discrete-sectional 모델을 사용하여 이론적으로 고찰하였다. 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장을 분석하기 위해 monomer 크기, monomer 생성 속도 등의 공정 변수들을 변화시켰다. 입자 크기가 40 nm 이상인 큰 입자들은 플라즈마 반응기 내에서 대부분이 음으로 존재하였으며 40 nm 이하인 작은 입자들은 음성, 중성 혹은 양으로 존재하였다. 입자 충돌에 의해 입자 크기가 증가함에 따라 입자 표면적의 증가와 더불어 입자가 가지는 평균 음전하수도 증가하였다. 입자 충돌에 의해 큰 입자들이 생성됨에 따라 입자크기분포는 2개의 모드로 양분화됐다. 본 연구의 이론 결과와 Shiratani 등 [3]의 실험 결과가 비교적 잘 맞았으며 본 연구에서 사용한 모델식은 플라즈마 반응기 내에서 수 나노 크기의 입자 성장 연구에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### Abstract

We used the discrete-sectional model to analyze the particle growth by coagulation of particles in silane plasma reactor, considering the Gaussian distribution function for particle charges. The effects of process conditions such as monomer size and mass generation rate of monomers on particle growth in plasma reactor were analyzed theoretically. Based on the Gaussian distribution function of particle charges, the large particles of more than 40 nm in size are almost found to be charged negatively, but some fractions of small, tiny particles are in neutral state or even charged positively. As the particle size and surface area increase with time by particle coagulation, the number of charges per particle increases with time. As the large particles are generated by particle coagulation, the particle size distribution become bimodal. The results of discrete-sectional model for the particle growth in silane plasma reactor were in close agreement with the experimental results by Shiratani et al. [3] for the same plasma conditions. We believe the model equations for the particle charge distribution and coagulation between particles can be applied to understand the nano-sized particle growth in plasma reactor.

## 1. 서 론

플라즈마 공정에서 입자들은 기상에서 플라즈마 화학 반응에 의한 균질상 입자 생성과 반응기 벽이나 전극에 이미 증착되었던 박막의 일부가 떨어져 나와 입자 생성의 핵으로 작용하는 비균질상 입자 생성 등 크게 두 가지 경로로 생성되며 입자 충돌과 응축에 의해 성장한다. 플라즈마 반응기 내에는 나노미터에서 마이크로까지 크기를 가지는 입자들이 존재하며 플라즈마 공정 중에 대부분의 입자들이 음으로 대전되어 반응기 내에서 작용하는 여러 힘들의 균형에 의해 plasma/sheath 경계 영역에 머무르는 것으로 알려져 있다. 반도체 제조 공정 중에 형성된 입자들에 의해 입자 오염이 유발되어 박막 특성, 박막의 균일성 및 반응기 효율성 등이 저하되고 있다[1-8].

플라즈마 공정에서의 입자 제어에 대한 관심의 증가로 입자 성장에 대한 많은 연구들이 수행되고 있다. 최근에 발표된 문헌에 의하면 플라즈마 영역에서 입자들은 1-10 nm 크기의 작은 입자군과 100' smm 이상의 큰 입자군으로 나뉘어 존재하는 것으로 나타났다. 큰 입자군에 속하는 입자들은 거의 구형으로 성장하며 1-10 nm의 작은 입자들로 구성되어 있어 작은 입자들간의 응집에 의해 성장하는 것으로 여겨진다 [1-8]. Hollenstein 그룹 [1,2]은 사일렌 플라즈마나 Ar 플라즈마 내에서 입자들이 성장하는 동안 입자 크기와 농도를 광산란법(laser light scattering method)에 의해 추정하였으며 Brownian 자유분자 충돌모델을 사용하여 입자 성장을 분석하였다. Watanabe 그룹 [3-5]은 광산란법을 사용하여 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장에 관해 연구하였으며 입자들은 초기 성장 단계, 급속 성장 단계, 성장 포화 단계를 거쳐 성장함을 보였다. Fukuzawa 등 [6]은 저압 rf 사일렌 플라즈마 반응기에서 입자 직경<10 nm인 입자들의 입자 성장을 연구하였다. 초기 성장 단계에서 입자들은  $Si_nH_x$ 들의 응축에 의해 성장하고 입자 농도  $>10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 부터 입자 충돌에 의해 성장하였으며 대부분의 입자들은 중성인 것으로 나타났다. Kortshagen과 Bhandarkar 등 [7]은 저압 플라즈마 공정에서 나노 크기의 입자 성장에 대해 연구하였으며 중성 입자들간의 충돌보다는 반대 전하를 가지는 입자들간의

충돌이 입자 성장에 더 큰 영향을 미침을 보였다. Childs와 Gallagher [8]는 a-Si:H 박막 제조를 위한 rf 사일렌 플라즈마 반응기에서 입자 성장을 광산란법을 사용하여 연구하였으며 압력이나 rf 전위가 증가함에 따라 입자 성장 속도는 증가하였고 대부분의 입자들은 중성을 존재함을 보였다. Kim 등 [9-12]은 사일렌 플라즈마 반응기 내에서 입자 생성과 성장 및 거동을 모델식을 사용하여 이론적으로 분석하였다.

본 연구에서는 discrete-sectional 모델을 사용하여 플라즈마 반응기 내에서 공정 변수 변화가 입자 충돌에 의한 입자 성장에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 입자 성장에 입자 전하의 영향을 고려하기 위해 플라즈마 조건 변화에 따라 입자 전하 분포를 계산하여 입자 전하를 고려한 입자 성장 속도를 계산하였다.

## 2. 이 론

플라즈마 반응기 내에서 입자 충돌에 의한 입자 성장식을 간략화하기 위해 본 연구에서는 플라즈마 반응기를 CSTR(continuously stirred tank reactor)로 가정하였으며 개략도는 그림 1과 같다. 플라즈마 반응기 내로 유체는  $u$ 의 속도로 유입되며 입자들은 전원 공급 후 플라즈마 벌크 영역에서 생성된 후 입자 충돌에 의해 성장하게 된다. 플라즈마 반응기 내에서 입자들은 입자들로의 전자와 이온간의 흐름 균형에 의해 전하를 가지고 입자들 중  $f_{out}$  정도가 유체에 의해 반응기 밖으로 쏠려 나가게 된다.  $(1 - f_{out})$ 의 입자들은 플라즈마 반응기 내에서  $\tau_{res}$  동안 머물면서 입자 충돌에 의해 성장하며 작은 입자군과 큰 입자군으로 나뉜다. 공정 변수 변화에 따라 반응기 내에서의 입자들의 크기분포 ( $q_i, Q_k$ )와 전자 농도는 변하게 된다.

입자 전하를 고려한 입자 성장을 모델화하기 위해서는 플라즈마 반응기 내에서 입자가 가지는 입자 전하 분포의 표현이 중요하다. Matsoukas 등 [13,14]은 플라즈마 영역에서 입자들의 전하분포를 Gaussian 형태로 표현하였으며 입자들의 평균전하와 표준편차 등을 플라즈마 조건 변화에 따라 계산하였다. 본 연구에서는 플라즈마 반응기 내에서 Gaussian 형태로 표현된 입자 전하 분포를 사용하여 각 discrete와

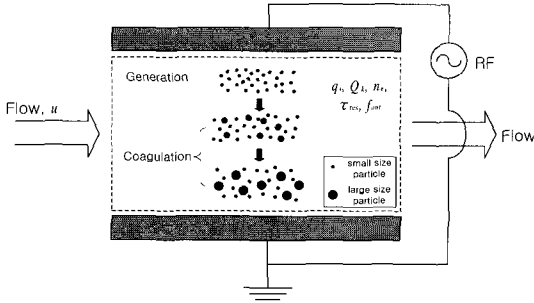


그림 1 Model of particle growth in glow discharge plasma reactor.

sectional 구간에서 중성, 양성, 음성으로 존재하는 입자들의 분률 ( $F_{new}$ ,  $F_{pos}$ ,  $F_{neg}$ )과 양성 혹은 음성으로 존재하는 입자들의 평균 음전하수 ( $\bar{q}_{pos}$ ,  $\bar{q}_{neg}$ )를 계산하여 입자 충돌에 의한 입자 성장속도를 계산하였다. 플라즈마 반응기 내에서 입자 충돌에 의한 입자 성장을 분석하기 위해 입자 충돌중 동일 전하를 가지는 입자간의 충돌은 무시하였고 중성 입자간의 충돌과 중성 입자와 음성 혹은 양성 입자간의 충돌을 고려하였다. 본 연구에서는 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장을 분석하고 효율적인 계산을 위해 입자 크기 영역을  $i_{max}$  개의 discrete regime과  $k_{max}$  개의 sectional regime으로 나누어 입자 성장을 해석하는 discrete-sectional 모델을 사용하였다. discrete regime에서 monomers에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dq_1}{dt} = S_1\nu_1 - q_1 \sum_{j=1}^{k_{max}} (G_{1,j}\beta_{1,j}^* q_j) - q_1 \sum_{k=1}^{i_{max}} (G_{1,k}{}^4\bar{\beta}_{1,k}^D Q_k) - f_{out} \frac{q_1}{\tau_{res}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $q_1$ 는 monomers에 대한 부피농도를 나타내며  $S_1$ 는 monomers의 질량 생성 속도를 나타낸다.  $\beta_{1,j}^*$ 와  ${}^4\bar{\beta}_{1,k}^D$ 는 모노머( $i=1$ )와  $j$  번째 discrete regime 및  $k$  번째 sectional regime의 입자와의 충돌빈도함수를 각각 나타낸다.  $f_{out}$ 는 유체에 의해 반응기 밖으로 흘러나가는 입자들의 비율을 나타내고  $\tau_{res}$ 는 반응기 내 체류시간을 나타낸다. 오른쪽의 첫 번째 항은 monomers 생성의 영향을 나타내고 두 번째와 세 번째 항은 입자 충돌에 의한 monomers 생성과 소멸의 영향을 나타내며 마지막 항은 유체대류의

영향을 나타낸다.  $i$ 번째 discrete regime에 입자에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\frac{dq_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i-1} (G_{i,(i-j)}\beta_{i,(i-j)}^* q_j q_{(i-j)}) - q_i \sum_{j=1}^{i_{max}} (G_{i,j}\beta_{i,j}^* q_j) - q_i \sum_{k=1}^{k_{max}} (G_{i,k}{}^4\bar{\beta}_{i,k}^D Q_k) - f_{out} \frac{q_i}{\tau_{res}} \quad (2)$$

식 (2)에서 오른쪽의 첫 번째 항과 두 번째 항은 discrete regime에 있는 입자들간의 충돌에 의한  $q_i$ 의 생성과 소멸의 영향, 세 번째 항은  $i$ 번째 입자와 sectional regime에 있는 입자간의 충돌에 의한  $q_i$  소멸의 영향, 마지막 항은 유체 대류의 영향을 나타낸다. sectional regime에서  $k$ 번째 구간의 입자들에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_k}{dt} = & \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{i_{max}} (G_{i,j}{}^1\bar{\beta}_{i,j}^{DD} Q_i Q_j) \\ & + \sum_{j=1}^{i_{max}} \sum_{j=1}^{k-1} (G_{i,j}{}^1\bar{\beta}_{i,j}^D Q_i Q_j) - Q_k \sum_{j=1}^{i_{max}} (G_{i,k}{}^2\bar{\beta}_{i,k}^D Q_i) \\ & + Q_k \sum_{j=1}^{i_{max}} (G_{i,k}{}^5\bar{\beta}_{i,k}^D Q_i) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{j=1}^{k-1} (G_{i,j}{}^1\bar{\beta}_{i,j,k} Q_i Q_j) \\ & - Q_k \sum_{j=1}^{k-1} (G_{i,k}{}^2\bar{\beta}_{i,k} Q_i) + Q_k \sum_{j=1}^{k-1} (G_{i,k}{}^5\bar{\beta}_{i,k} Q_i) \\ & - \frac{1}{2} G_{k,k}{}^3\bar{\beta}_k Q_k^2 + \frac{1}{2} G_{k,k}{}^6\bar{\beta}_k Q_k^2 \\ & - Q_k \sum_{k=K+1}^{k_{sec}} (G_{i,k}{}^4\bar{\beta}_{i,k} Q_i) - f_{out} \frac{Q_k}{\tau_{res}} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서는 discrete regime에 있는 입자들간의 충돌빈도함수,  ${}^1\bar{\beta}_{i,j}^{DD}$ 는 discrete regime에서  $i$ 번째 입자와  $j$ 번째 sectional regime에 있는 입자간의 충돌빈도함수,  ${}^2\bar{\beta}_{i,1}^D$ 와  ${}^5\bar{\beta}_{i,1}^D$ 는  $i$ 번째 discrete regime의 입자와 첫 번째 sectional regime에 있는 입자들간의 충돌빈도함수를 나타낸다.  ${}^1\bar{\beta}_{i,j,k}$ 는  $i$ 번째와  $j$ 번째 sectional regime에 있는 입자들간의 충돌빈도함수,  ${}^2\bar{\beta}_{i,k}$ 와  ${}^5\bar{\beta}_{i,k}$ 는  $i$ 번째와  $k$ 번째 sectional regime에 있는 입자들간의 충돌빈도함수,  ${}^3\bar{\beta}_1$ 와  ${}^6\bar{\beta}_1$ 는 첫 번째 section regime에 있는 입자들간의 충돌빈도함수,  ${}^4\bar{\beta}_{i,1}$ 는 첫 번째와  $i$ 번째 sectional regime에 있는 입자간의 충돌빈도함수를 각각 나타낸다. 우변의 첫 번째 항은 discrete regime에 있는 입자들간의 충돌

돌에 의한  $Q_k$  생성의 영향을 나타낸다. 두 번째 항부터 네 번째 항까지는 discrete regime과 sectional regime에 있는 입자들간의 충돌에 의한  $Q_k$ 의 생성과 소멸의 영향을 나타낸다. 다섯 번째 항부터 열 번째 항까지는 sectional regime에 있는 입들간의 충돌에 의한  $Q_k$ 의 생성과 소멸의 영향을 나타내며 마지막 항은 유체 대류의 영향을 나타낸다.

discrete-sectional model의 정확성은  $imax$ ,  $f_s$ ,  $Q$  (농도, 표면적,  $v$ ,  $v^2$ )에 따라 결정된다.  $imax$ 는 입자 크기분포함수를 discrete regime과 sectional regime으로 나누면서 유발되는 오차를 최소화하기 위해 20으로 하였다.  $f_s$ 는 입자 생성과 성장만을 고려하였을 때 self-preserving 결과와 discrete-sectional model 결과가 가장 잘 근사하였을 때 값으로 1.05를 사용하였다. 입자 충돌에 의한 입자 성장을 분석하므로 sectional regime에서 입자 부피가 보존되는 것으로 가정하였다. 플라즈마 반응기 내에서 입자 성장에 대한 모델식 (식 (1)-(3))을 상미분 방정식 solver인 DGEAR subroutine을 사용하여 풀었다. 입자가 성장함에 따라 플라즈마 영역에서의 플라즈마 조건은 변화하게 되므로 벌크 플라즈마 영역에서 전기적인 중성 조건을 만족시키기 위한 전자 농도를 매 time step마다 계산하였으며 전자 농도로부터 입자 전하 분포와 중성, 양성, 음성으로 존재하는 입자들의 분률, 및 입자들의 평균량을 계산한 후  $G_{i,j}$ 를 계산하였다. 본 연구에서 사용한 전기적 중성 조건은 sheath 영역에서는 사용할 수 없으나 벌크 플라즈마 영역이나 대부분의 입자들이 발견되는 sheath 경계영역에서는 사용할 수 있을 것으로 본다.

### 3. 결과 및 고찰

플라즈마 반응기 내에서 입자 충돌에 의한 입자 성장을 분석하기 위해 discrete-sectional 모델을 사용하였고 monomer 크기( $d_0$ ), monomer 생성 속도( $S_1$ ) 등과 같은 공정 변수를 변화시켰다. 공정 변수에 대한 기준조건으로 monomer 크기, monomer 생성 속도를 10 nm,  $9.73 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 로 각각 사용하였다. 반응기 내 체류시간,  $f_{out}$ , 양이온 농도, 음이온 농도, 양이온 온도, 전자 온도는 0.485 s, 0.01,  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ , 300 K, 2 eV를 각각 사용하였다.

그림 2에서는 기준 조건하에서 입자 충돌에 의한 입자크기분포 변화를 시간 변화에 따라 나타냈다. 0.1 s에서는 입자 생성에 의한 작은 입자들이 대부분 존재하게 되므로 입자크기 모드가 1개인 것으로 나타났다. 시간이 자남에 따라 입자 충돌에 의한 입자 성장 속도의 증가로 입자들의 크기는 증가하게 된다. 0.5 s에서는 입자 충돌에 의해 큰 입자들이 생성됨에 따라 입자크기분포가 2개의 모드로 나타나고 있다. 큰 입자들이 존재하면서부터 큰 입자와의 충돌에 의한 작은 입자들의 소모속도가 생성속도보다 빠르게 되어 작은 입자들의 농도는 감소하게 되고 큰 입자들은 성장하게 된다. 0.5 s 이후부터 입자 충돌의 영향으로 작은 크기 입자들의 농도는 감소하고 큰 입자들의 크기는 증가하고 있어 입자 크기 모드가 점점 더 양분화되고 있다. 플라즈마 반응기 내에서 작은 입자들은 플라즈마 조건에 따라 음성, 중성, 혹은 양성으로 존재할 수 있으며 입자 충돌에 의해 성장한 대부분의 큰 입자들은 음으로 대전된다. 본 연구에서는 같은 전하를 가지는 입자들간의 충돌을 무시하였으므로 큰 입자들간의 입자 충돌은 기대할 수 없으며 큰 입자들은 작은 입자들

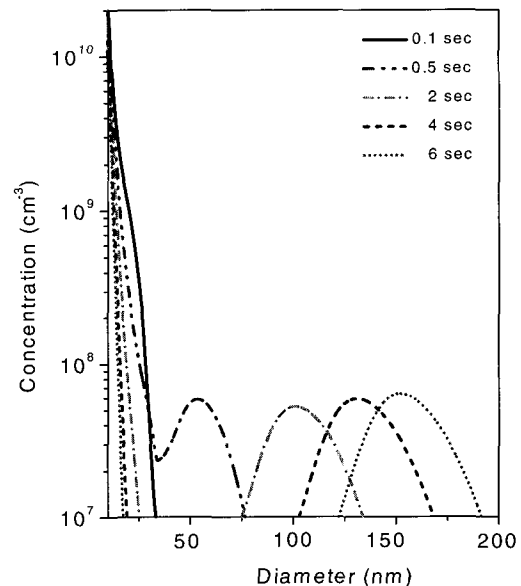


그림 2 The change of the predicted particle size distribution for various times( $S_1=9.73 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,  $d_0=10\text{nm}$ ,  $\tau_{res}=0.485 \text{ s}$ ,  $f_{out}=0.01$ ,  $f_s=1.05$ ).

과의 충돌에 의해 성장하게 된다. 따라서 2 s 이후부터 시간이 지남에 따라 큰 입자들에 대한 모드는 일정한 최대 농도와 폭을 가지면서 입자크기가 큰 쪽으로 이동하고 있다.

그림 3에서는 기준 조건하에서 입자 크기에 따른 입자 전하 분포를 시간에 따라 나타냈다. 입자 크기가 증가함에 따라 전자가 충돌하게 되는 입자 표면적은 증가하게 되므로 입자가 가지는 평균 음전하수는 증가하고 있다. 입자들의 전체 농도가 1 s 일 때는 약  $3.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 4 s 일 때 약  $2.4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 로 각각 나타났으며 전기적 중성 조건을 만족하기 위한 전자 농도는 약  $2.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ,  $2.7 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 로 각각 나타났다. 따라서 시간이 지남에 따라 입자 충돌의 영향으로 전체 입자 농도는 감소하고 전기적 중성 조건을 만족시키기 위해 전자와의 충돌로 입자들이 가지는 평균 음전하수는 증가하고 있다. 1 s 일 때 입자 크기가 40 nm인 입자들의 약 96% 정도가 음으로 존재하였으며 40 nm 이상인 입자들은 대부분이 음으로 존재하였다.

Monomer 크기 변화에 따른 입자들의 크기분포 변화를 그림 4에 나타냈다. 입자크기분포는 입자

생성에 의한 작은 입자영역과 입자 충돌에 의한 큰 입자영역으로 나뉘어져 있다. 큰 입자군의 입자 크기가 증가함에 따라 작은 입자군의 입자들은 큰 입자와의 빠른 입자 충돌에 의해 큰 입자 생성보다는 큰 입자들의 성장에 더 많이 소모된다. Monomer 질량 생성 속도는 일정하고 monomer 크기가 감소함에 따라 monomer 생성량은 증가하게 되므로 입자 충돌 속도는 증가하게 되어 입자들은 더 빠르게 성장하고 있다. 입자들이 더 빠르게 성장함에 따라 큰 입자와의 충돌에 의한 작은 입자들의 소모 속도는 증가하게 되어 작은 입자들의 농도는 감소하고 있고 큰 입자들의 생성 속도는 감소하게 되어 큰 입자군의 농도도 감소하고 있다. 그림 5에서는 monomer 생성 속도 변화에 따른 입자크기 분포를 나타냈다. 입자크기 영역은 2개의 모드로 나뉘고 있다. Monomer 생성 속도가 증가함에 따라 monomer 생성량의 증가로 입자 충돌 속도는 증가하게 되어 입자들은 더 빠르게 성장하고 있으며 입자크기 영역의 양분화가 더 극대화되고 있다. 큰 입자군의 입자크기가 증가함에 따라 작은 입자들의 대부분은 입자 성장에 소

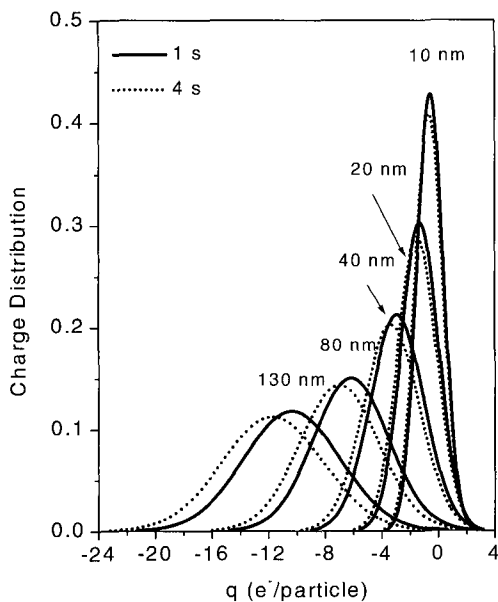


그림 3 The particle charge distributions in plasma reactor for various times ( $S_1=9.73 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ,  $d_0=10 \text{ nm}$ ).

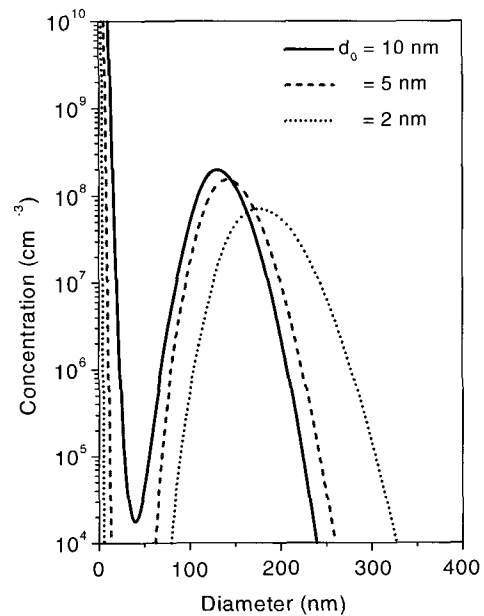


그림 4 The change of the predicted particle size distribution for various monomer diameters at 4 s ( $S_1=9.73 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ,  $\tau_{res}=0.485 \text{ s}$ ,  $f_{out}=0.01$ ,  $f_s=1.05$ ).

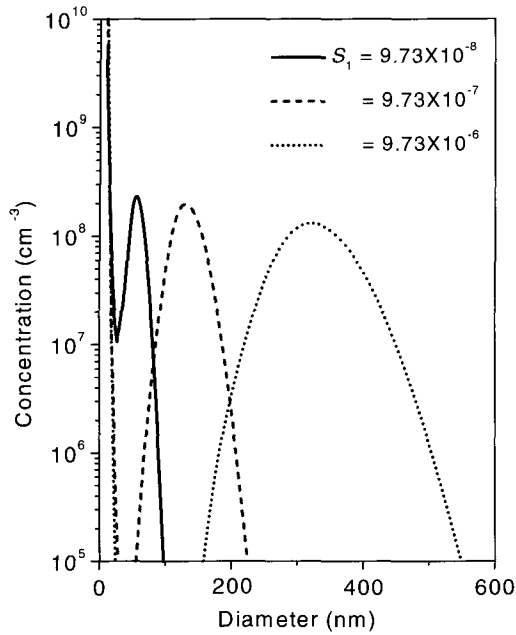


그림 5 The change of the predicted particle size distribution for various monomer generation rates at 4 s ( $d_0=10$  nm,  $\tau_{res}=0.485$  s,  $f_{out}=0.01$ ,  $f_s=1.05$ ).

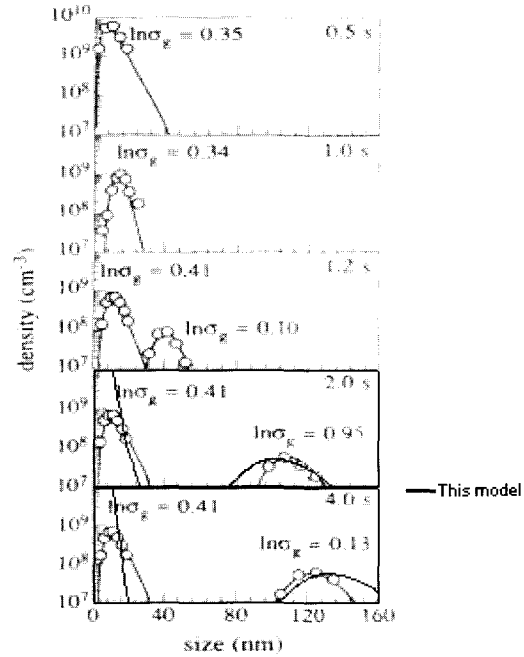


그림 6 The comparison of the predicted size distributions of particles with the experimental results by Shiratani et al. [3]

모되어 큰 입자들의 생성 속도는 감소하게 되어 큰 입자군의 농도는 감소하고 있다.

본 연구의 이론 결과와 Shiratani 등 [3]의 문헌으로부터 발췌한 실험 결과를 동일 공정 조건(monomer 생성 속도가  $9.73 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , monomer 크기가 10 nm, 반응기내 체류시간 0.485 s) 하에서 비교한 것을 그림 6에 나타냈다. 입자크기영역은 입자 충돌에 의해 성장한 큰 입자군 영역과 입자 생성에 의한 작은 입자군 영역으로 나뉘어져 있다. 입자 충돌에 의해 입자들은 성장하고 있다. 본 연구의 결과가 실험 결과 [3]와 비교적 잘 맞고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 입자 전하를 고려한 discrete-sectional 모델을 사용하여 입자 성장을 모델식을 사용하여 플라즈마 반응기 내에서의 입자 성장을 이론적으로 고찰하였다. 또한 입자가 성장함에 따라 입자가 가지는 평균 음전하수와 표준 편차 및 전하 분포 등도 계산하였다.

기존 조건하에서 입자 크기가 40 nm이하인 입자들은 플라즈마 반응기 내에서 음성, 중성 혹은 양으로 존재하였다. 입자 충돌에 의해 입자 크기가 증가함에 따라 입자 표면적의 증가와 더불어 입자가 가지는 평균 음전하수도 증가하였으며 40 nm이상인 큰 입자들은 대부분이 음으로 존재하였다. 입자 성장 초기에는 입자 생성의 영향으로 입자크기분포는 1개의 입자 크기모드로 나타났으며 시간이 자남에 따라 입자 충돌 속도의 증가로 큰 입자들이 생성되어 입자크기분포는 2개의 모드로 양분화되었다. 큰 입자들이 존재하면서부터 큰 입자와의 충돌에 의한 작은 입자들의 소모속도가 생성속도보다 빠르게 되어 작은 입자들의 농도는 감소하였고 큰 입자들은 입자 충돌에 의해 계속 성장하였으며 입자크기 모드는 점점 더 양분화되었다. 작은 입자들은 큰 입자 생성보다 큰 입자와의 입자 충돌에 더 많이 소모되어 큰 입자들의 입자 크기 모드는 일정한 최대 농도와 폭을 가지면서 입자크기가 큰 쪽으로 이동하였다.

본 연구의 이론 결과와 Shiratani 등 [3]의 실험 결과가 비교적 잘 맞았으며 본 연구에서 사용한 discrete-

sectional 모델은 플라즈마 반응기 내에서 수 나노 크기의 입자 성장 연구에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 추진하는 21세기 프런티어 사업 중 테라급 나노소자 개발 사업단 지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] A. A. Howling, L. Sansonnens, J.-L. Drier and Ch. Hollenstein, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **26**, 1003 (1993).
- [2] C. Courteille, Ch. Hollenstein, J.-L. Drier, P. Gay, W. Schwarzenbach, A. A. Howling, E. Bertran, G. Viera, R. Martins and A. Macarico, *J. App. Phys.* **80**(4), 2069 (1996).
- [3] M. Shiratani, H. Kawasaki, T. Fukuzawa, T. Yoshioka, Y. Ueda, S. Singh and Y. Watanabe, *J. Appl. Phys.* **79**(1), 104 (1996).
- [4] Y. Watanabe, M. Shiratani, H. Kawasaki, S. Singh, T. Fukuzawa, Y. Ueda and H. Ohkura, *J. Vac. Sci. Technol. A* **14**, 540 (1996).
- [5] Y. Watanabe, *Plasma Phys. Control. Fusion* **39**, A59 (1997).
- [6] T. Fukuzawa, S. Kushima, Y. Matsuoka, M. Shiratani and Y. Watanabe, *J. Appl. Phys.* **86** (7), 3543 (1991).
- [7] U. Kortshagen and U. Bhandarkar, *Phys. Rev. E* **60**(1), 887 (1999).
- [8] M. A. Childs and A. Gallagher, *J. Appl. Phys.* **87**, 1076 (2000).
- [9] D.-J. Kim and K.-S. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**, 4989 (1997).
- [10] D.-J. Kim and K.-S. Kim, *Aerosol Sci. Technol.* **32**, 293 (2000).
- [11] K.-S. Kim and D.-J. Kim, *J. Appl. Phys* **87**, 1 (2000).
- [12] D.-J. Kim, Y. R. Choi and K.-S. Kim, *Plasma Chem. Plasma Process.* accepted (2001).
- [13] T. Matsoukas and M. Russell, *J. Appl. Phys.*, **77**(9), 4285 (1995).
- [14] T. Matsoukas, M. Russell and M. Smith, *J. Vac. Sci. Technol., A* **14**(2), 624 (1996).