

## 수평 및 수직형 CVD 증착로의 실리콘 부착에 관한 수치해석

김 인\* · 백 병 준\*

(2001년 4월 11일 접수, 2002년 1월 2일 심사완료)

### Numerical Analysis of Silicon Deposition in Horizontal & Vertical CVD Reactor

In Kim and Byung Joon Baek

**Key Words:** CVD(화학증착법), Deposition Rate(부착률), Chemical Species(화학종), Mass Fraction(질량분율), Susceptor(반응부), Diffusion Coefficient(확산계수)

#### Abstract

The fluid flow, heat transfer and the local mass fraction of chemical species in the chemical vapor deposition(CVD) manufacturing process are studied numerically. Flow with a dilute precursor concentration of silane in hydrogen as the carrier gas enters to the reactor and deposits silicon onto the heated surface. The silicon deposition rate using silane is calculated in the horizontal or vertical, axisymmetric reactor. The effects of inlet carrier gas velocity, mass fraction of silane, susceptor angle and rotation of surface on the deposition rate are described.

#### 기호설명

H : 채널의 높이 (mm)  
 h : 반응면과 노즐의 거리 (mm)  
 L : 채널의 반응영역 길이 (mm)  
 D : 반응면의 직경 (mm)  
 d : 노즐의 직경 (mm)  
 m : 질량분율  
 Nu : Nusselt 수  
 P<sub>silane</sub> : 사일렌 가스의 분압 (Pa)  
 Re : Reynolds 수 ( $=\rho u_{\infty}H/\mu$ )  
 T<sub>s</sub> : 반응면 온도 (K)

T<sub>c</sub> : 냉각면 온도 (K)  
 u : x 축 방향의 속도 (m/s)  
 u<sub>∞</sub> : 입구 유입 속도 (m/s)  
 ρ : 유체의 밀도 (kg/m<sup>3</sup>)  
 γ : 반응면의 기울기 (°)  
 μ : 유체의 점성계수(kg/m sec)

#### 1. 서 론

CVD(chemical vapor deposition)는 활성화에너지를 이용하여 가스를 분해함으로써 고체상태의 안정된 박막을 기판 위에 형성하는 것을 말한다. 이 단결정 구조의 박막은 압력 0.1~1.0 기압, 온도 1000K 내외의 작업 조건에서 생성되며, 반응기의 형상, 가스의 유량 및 속도 분포, 열적 경계 조건, 반응 가스의 성분 등의 매개변수들은 부착되는 막의 균일성과 성장률에 큰 영향을 미친다.

CVD를 이용한 박막성장 장치는 일반적으로 가스나 박막의 성분을 구성하는 원료가스, 가스의

† 책임저자, 회원, ATES (컨설팅 사업부),  
E-mail: inkim@ates.co.kr

TEL : (02)3661-6411 FAX : (02)3664-7251

\* 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소

분배 및 혼합장치, 반응로(reactor), 기판의 가열장치, 반응압력과 반응이 끝난 가스의 배기 장치로 구성된다. 일반적으로 박막의 성장 및 성장된 박막의 특성에 영향을 주는 주요한 요소들은 반응가스의 특성, 순도와 공급되는 활성화에너지의 양, 기판의 온도, 반응물의 비율, 가스의 질량유량, 반응로의 기하학적 형상 등이다.

일반적으로 사용되고 있는 반응장치로는 수평과 수직 CVD 반응기가 있다. 수평 CVD 반응기의 구성은 수평채널 내에 부착이 일어나는 반응부(susceptor)와 반응 영역 앞에 반응물의 침전을 막기 위해 냉각된 입구부분으로 되어 있다. 수직 CVD 반응기는 반응면 위의 입구에서 원료가스가 아래로 흐르는 형태이다. 다공성 매질을 이용한 유동 분배기를 사용하여 유입되는 속도를 균일하게 하여 웨이퍼 표면의 부착률 균일화를 꾀하는 것이 현재 많이 사용되고 있는 방법이다.<sup>(1)</sup>

최근 국내에서도 CVD에 대한 관심이 증가하여 오성진 등<sup>(2)</sup>은 CVD 반응기 내의 혼합대류 열전달 특성을 분석하였으며, 이세영 등<sup>(3)</sup>은 반도체 웨이퍼용 베이킹 장치의 균일 유동장을 위한 개선방안을 제시하였다. 조원국 등<sup>(4)</sup>은 입구 농도분포의 최적화를 통하여 웨이퍼 표면에서의 균일한 박막 형성 조건을 제시하였으나, 물질전달 및 화학반응을 고려한 반응로에 대한 총괄적인 연구는 미흡한 실정이다.

반응기 내부에서 일어나는 반응은 채널의 형상과 여러 가지 유입조건에 따라 부착률이 변하게 된다. 반응기의 형상을 고려한 열 및 유체역학적 해석이 Jensen 등<sup>(5)</sup>과 Evans와 Greif<sup>(6)</sup>에 의해 수행되었으며, 최근에는 물질전달을 고려하여 실제 CVD 공정과 가깝게 수치모사를 수행하는 연구가 많이 진행되고 있다.

Chiu 등<sup>(7)</sup>은 2차원 수평 반응면을 주 유동방향과 같은 방향과 반대 방향으로 이동시키며 연속적인 CVD 시스템의 부착률을 해석하였으며, 반응면의 이동이 증착률에 미치는 영향을 검토하였다.

Eversteyn<sup>(8)</sup>은 채널 내에서 발생하는 경계층에 관한 연구를 수행하여, 채널내의 온도 분포에 따른 경계층 두께를 실험적으로 분석한 바 있다. 또한 반응면에 놓인 가열된 웨이퍼로 수직하게 주입되는 수직 CVD 반응기에 대하여 가스의 반응을 고려할 수 있는 수치적 모델이 제안되는 등<sup>(9,10)</sup> 연구의 발전이 계속되고 있으나, 박막의 성장에 미치는

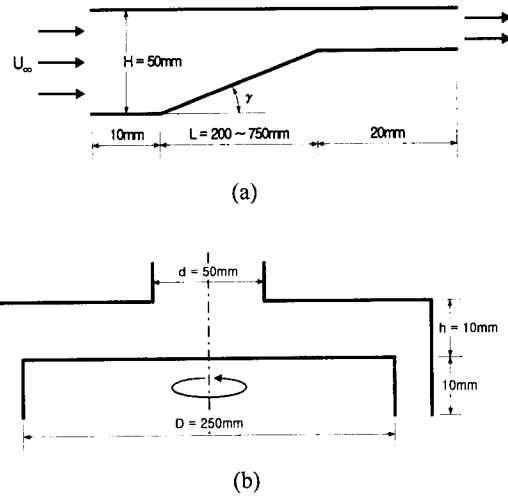


Fig. 1 Schematic of two-dimensional horizontal & vertical CVD model

각종 요인분석이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 반응기의 형상, 즉 반응면의 경사각( $\gamma$ )과 온도, 회전수, 가스의 유입조건을 변화시키며 부착률에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 수치적 연구

### 2.1 해석모델

본 연구에서 채택한 계산모델의 기하학적인 형상은 Fig. 1(a)와 같이 기울어진 고온부를 갖는 2차원 수평 채널과 Fig. 1(b)와 같이 반응면에 수직으로 원료가스가 주입되는 원통형 반응로를 사용하였다. CVD 반응에 의한 박막 성장은 반응가스의 유입, 반응기 내 경계층을 통한 확산, 기판의 표면에 흡착, 흡착된 가스의 반응, 반응 후 부산물 탈착 및 배출의 연속적인 과정에 의해 이루어진다. 비교적 높은 반응면 온도를 사용하는 CVD 공정에서는 표면반응이 빠르게 이루어지기 때문에 증착률은 대부분 표면에 도달되는 반응물의 전달률에 의해 제한되며, 경계층 현상에 의해 결정된다.<sup>(11)</sup>

사일렌(silane,  $\text{SiH}_4$ )을 사용한 실리콘 부착을 고찰하기 위하여, 사일렌을 수송하는 기체로는 1기압의 수소 가스를 사용하였다. 이때 가스의 속도는  $0.1 \sim 0.7 \text{ m/s}$ 로 변화시켜 그 영향을 검토하였다. 또한 입구를 통해 유입되는 사일렌과 수소 가스의 질량분율과 유속을 변화시켜 검토하였다.

수평 채널은 높이  $H$ 는 50mm이고 반응부 길이  $L$ 은 200~750mm로 변화시켰다. 반응이 일어나는 반응면의 온도  $T_s$ 는 1000~1300K의 범위이며, 경사각은  $0 \sim 10^\circ$ 이다. 수직채널은 노즐의 높이  $h$ 는 10mm이고 반응면의 직경  $D$ 는 250mm, 입구직경  $d$ 는 50mm이다. 또한  $0 \sim 100$ rpm 범위의 반응면의 회전수가 반응면에 부착되는 실리콘(Si)의 부착률에 미치는 영향을 검토하였다.

## 2.2 해석방법 및 경계조건

반응기내에서의 유동특성과 화학반응을 고찰하기 위하여 유한체적 프로그램인 FLUENT를 사용하여 해석하였다. 반응면을 통한 열전달과 원료가스의 유동은 정상상태 층류 유동에 대한 일반적인 질량 보존, 운동량 보존, 에너지식을 적용하였으며 화학종(chemical species)에 대한 보존 방정식은  $i'$  번째 화학종에 대한 대류-확산식의 해를 통하여 국소 질량분율(local mass fraction)을 예측할 수 있는 다음의 식을 적용하였다.<sup>(12)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho m_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_i) = -\frac{\partial}{\partial x_j} J_{i,j} + R_i \quad (1)$$

여기에서  $J_{i,j}$ 는  $i'$  번째 화학종의 농도 기울기에 의한 확산 플럭스이며

$$J_{i,j} = -\rho D_{i,m} \frac{\partial m_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

로 계산된다.  $D_{i,m}$ 은 화합물에서 화학종  $i'$ 의 확산계수이다.  $R_i$ 는 생성되거나 소멸되는 화학종의 반응율이며, 다음과 같은 Arrhenius 모델 계산식을 적용하여 계산하였다.

$$R_i = A \exp(-E/RT) \quad (3)$$

$A$ 는 반응에 참여하는 화학종의 빈도인자(frequency factor),  $E$ 는 반응 활성화 에너지이며, 이들 계수의 값은 참고문헌<sup>(12)</sup>에 제시된 값을 사용하였다.

운동량, 에너지 및 화학종 보존식의 계산을 위한 경계조건은 다음과 같다. 반응이 일어나는 고온부 영역은 1000~1300K 범위의 등온조건을 사용하였으며 반응면을 제외한 모든 면은 등온( $T_c=300$ K) 조건을 사용하였다. 입구가스의 온도, 질량분율, 속도는 균일한 값이며 출구에서는 그 변화율을 0으로 하였다. 화학종의 경계조건은 표면과 수직방향으로의 질량분율의 변화율이 0인

조건을 사용하여 표면에 도달된 질량분율에 의해 증착률을 계산하였다.

본 연구에서는 혼합대류 인자(mixed convection parameter)가  $Gr/Re^2 < 20$ 로서, 부력의 영향을 무시할 수 있으며, 매질이 복사에 비 참여 물질이고, 반응면의 온도가 일정한 점을 고려하여 복사의 영향을 고려하지 않았다.<sup>(13)</sup>

## 3. 해석결과 및 고찰

채널내의 수소 및 원료가스인 사일렌의 열 및 물질전달에 대한 계산을 수행하여, 반응면에 도달된 실리콘의 부착률에 대한 해석을 수행하였다.

사용된 격자분포는 입구, 벽면 및 반응면의 끝부분에 격자를 밀집시켰으며, 적정 격자수를 정하기 위하여 격자 밀도에 따른 부착률을 검토하였다. 수평반응로의 경우에는 격자수  $15 \times 100$ 에서  $45 \times 600$ 까지 부착률을 비교하여 최대오차가 2% 이내인  $45 \times 220$ 의 격자를 사용하였다. 육면체 격자를 사용한 수직형 축 대칭 반응로에서는 총 셀의 수를 58,452개로부터 증가시켜 최대 오차 변화를 검토하였다. 125,520개와 187,930개의 셀에서 오차가 1% 미만이었다. 따라서 본 연구에서는 125,520개의 육면체 셀을 격자계로 채택하였다.

Fig. 2는 해의 타당성을 검증하기 위하여 유사한 조건의 실험결과<sup>(8)</sup>와 비교한 것이다. 경사도  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $P_{\text{silane}}=124.1$ Pa,  $Re=12.3$ 에 대한 수치해석에 의한 결과는 반응면 선단에 근접한 위치를 제외하고 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 최대오차는 15%로서 사용된 수치모델 및 방법의 타당성을 나타내고 있으며, 수직형 반응로 형상에도 동일한 방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 선단부분에서의 실험결과와의 차이는 고온의 반응면과 접촉하고 있는 저온부의 온도를 300K로 설정한 조건이 실제 실험조건과 상이함으로서 발생된 것으로 풀이된다.

Fig. 3은 반응면의 경사도( $\gamma$ )에 따른 부착률의 변화를 보여주고 있다. 수평으로 놓인( $\gamma=0^\circ$ ) 반응면에 대해서는 반응면의 선단부에서 실리콘의 부착률이 급격히 감소한 후 전체 반응면에서 완만한 감소를 나타내고 있다. 이러한 완만한 감소

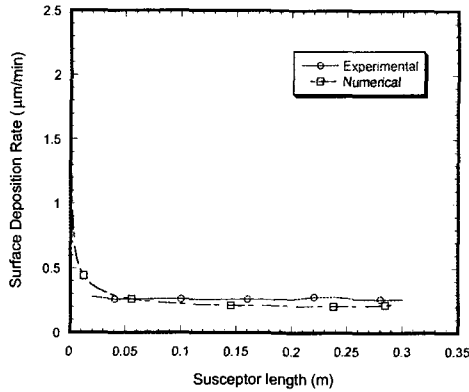


Fig. 2 Comparison of current result with experimental data(Eversteyn<sup>(8)</sup>) for silicon deposition

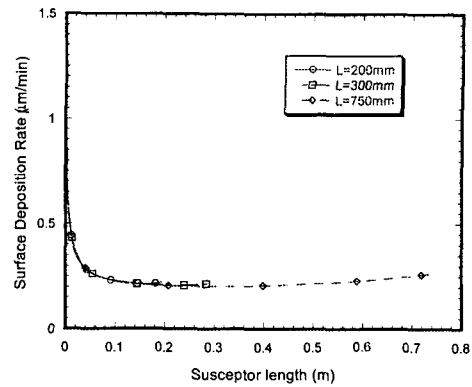


Fig. 4 Effect of susceptor length on the growth rate( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ ,  $P_{\text{silane}}=124.1\text{Pa}$ ,  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $T_S=1323\text{K}$ )

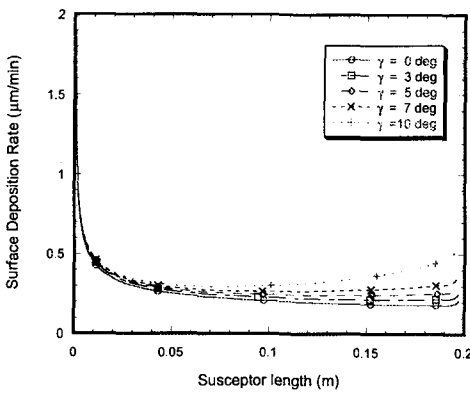


Fig. 3 Effect of susceptor angle on the growth rate ( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ ,  $P_{\text{silane}}=124.1\text{Pa}$ ,  $T_S=1323\text{K}$ ,  $L=300\text{mm}$ )

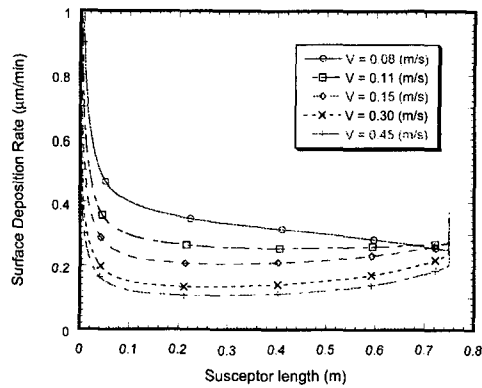


Fig. 5 Effect of inlet velocity on the growth rate ( $P_{\text{silane}}=124.1\text{Pa}$ ,  $T_S=1323\text{K}$ ,  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $L=750\text{mm}$ )

는 얇은 경계층 내에 존재하는 부착 입자의 결핍에 기인된다. 이 결핍은 경사도를 증가시킴으로써 완화시킬 수 있다. 경사도가 증가함에 따라 반응면의 후반부에서의 단면적이 작아지게 되고 원료가스의 속도가 증가함에 따라 부착두께 또한 증가하고 있다. 경사도가  $5^\circ$ 에 도달될 때까지 선단부를 제외한 영역에서 비교적 균일한 부착률을 갖는 박막의 성장이 가능하나, 그 이상의 경사각에서는 경사도에 따라 후반부에서 부착률이 급격히 증가함으로써 부착률의 불균일성이 증가함을 알 수 있다. 경사도  $\gamma$ 의 변화에 따른 증착률의 이러한 변화는 채널의 형상을 결정하는데 중요한 요소가 될 것이다.

Fig. 4는 반응면 길이( $L=200\text{mm}$ ,  $300\text{mm}$ ,  $750\text{mm}$ )에 따른 부착률의 변화를 나타낸 그림이다. 반응면의 전반부( $x < 0.5\text{m}$ )에서는 길이에 따른 부착률 변화는 거의 없었으나, 길이가 증가( $L=0.75\text{m}$ )한 반응면에서는  $x > 0.5\text{m}$ 에서 부착두께가 증가함으로써 두께의 불균일성을 야기하고 있다. 따라서 생산량 증대를 위한 반응면 크기를 확대하기 위해서는 경사각을 조절하여 경사도  $2.9^\circ$  이하로 유지하거나 또는 입구속도를 감소시키는 등의 적절한 조건을 동시에 고려해야 함을 알 수 있다.

Fig. 5는 반응면의 길이  $L=750\text{mm}$ , 경사각  $\gamma=2.9^\circ$ 일 때 반응면의 각 위치의 부착률에 미치

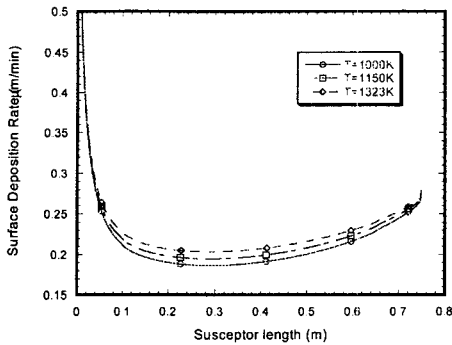


Fig. 6 Effect of susceptor temperature on the growth rate ( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ ,  $P_{\text{silane}}=124.1\text{Pa}$ ,  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $L=750\text{mm}$ )

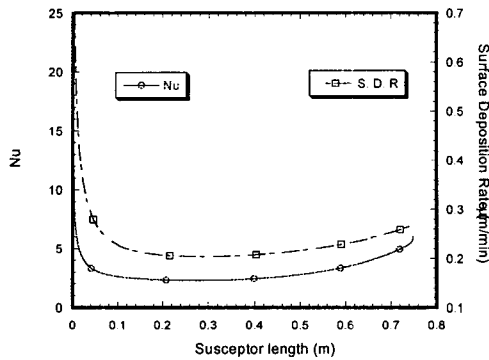


Fig. 7 Comparison of Nusselt number and growth rate ( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ ,  $P_{\text{silane}}=124.1\text{Pa}$ ,  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $T_S=1323\text{K}$ )

는 입구속도 영향을 도시한 것이다. 원료가스, 즉사 일렌의 량을 일정하게 유지하고 수송가스인 수소의 량을 변화하여 입구속도를 조절하였다. 수송가스의 속도가 저속( $u_{in}=0.08\text{m/s}$ )으로 유입될 때 부착물이 반응면의 길이 방향을 따라 감소하며, 가스속도가 증가함에 따라 전체 반응면에서 부착물은 감소한다. 또한 경사각에 의해 속도가 급격하게 증가하는 경사면의 끝에서 부착물이 증가하여 부착물 불균일이 나타난다. 중간 속도인  $u_{in}=0.11\text{m/s}$ 에서 유동방향과 무관하게 균일한 부착물이 형성됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 반응면 온도의 변화에 따른 부착물의 변화를 나타내고 있다. 일반적인 CVD 공정은 1000~1300K의 범위에서 이루어지고 있다. 그림에서 도시한 바와 같이 반응면의 양 끝단에서는 온도변화와 무관하게 유사한 두께의 실리콘이 부착되고 있으나 중심부의 대부분의 영역에서는 온

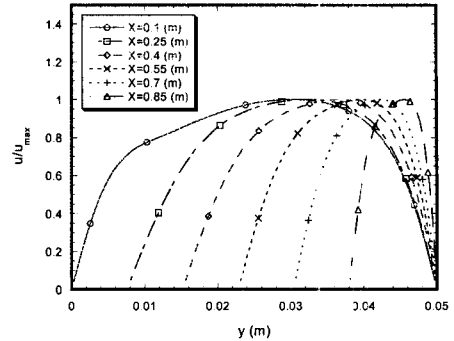


Fig. 8 Dimensionless velocity profile

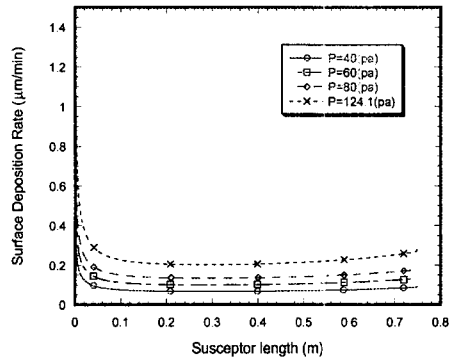


Fig. 9 Effect of precursor concentration on the growth rate ( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ ,  $\gamma=2.9^\circ$ ,  $T_S=1323\text{K}$ ,  $L=750\text{mm}$ )

도가 낮아질수록 부착물이 저하됨으로써 그 두께의 불균일성이 증가하고 있다. 이 부착두께의 변화는 경계층 내에서 반응면 온도 및 입구 속도와 관련된 열전달과 관련되어 변화한다고 할 수 있다.

Fig. 7은 반응면으로부터의 열전달과 부착두께의 정성적 비교를 나타낸 그림이다. 반응면의 Nu수는 고온인 반응면 시작점 근처에서 급격한 감소를 한 후 경계층이 성장됨에 따라 유동방향으로 완만하게 감소한다. 출구영역에서의 Nu수는 단면적 감소로 인한 유속의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 또한 실리콘의 부착물은 Nu의 변화와 동일한 경향으로 변화한다. 따라서 Nu의 변화에 의해 실리콘의 부착물 분포를 예측할 수 있음을 나타내고 있다.

Fig. 8은 반응면 위를 흐르는 채널의 각 위치에서 최대속도에 의해 무차원화된 단면의 속도변화를 도시한 것이다. 반응면의 선단( $x=0.1\text{m}$ )에서의

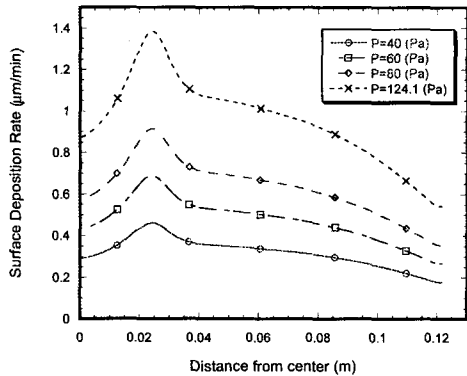


Fig. 10 Effect of precursor concentration for vertical CVD reactor( $u_{in}=0.3m/s$ , rpm=50)

완만한 속도 변화에 비하여 경사면의 끝 부근 ( $x=0.7m$ )에서는 단면 감소에 따른 급격한 속도 증가를 한다. 이 급격한 경계층 내 속도변화는 경계층 두께의 감소를 나타내며, 이 경계층 두께의 감소에 따라 부착률은 증가한다.

Fig. 9는 1기압의 수송기체에 포함된 사일렌의 분압에 따른 부착률의 변화를 나타낸 그림이다. 반응면 길이 750mm, 경사도  $\gamma=2.9^\circ$ , 입구가스 속도  $u_{in}=0.15m/s$ ,  $P_{silane}=40Pa$ 일 때 반응면의 대부분의 영역에서 균일한 두께의 부착이 이루어지고 있다. 수송기체 내의 사일렌의 농도를 증가시키기에 따라 부착두께는 농도에 비례하여 증가하고 있으나,  $P_{silane}=124.1Pa$ 에서 반응면 후반부의 부착률에 미세한 불균일성이 나타남을 알 수 있다. 따라서 물 분율을 제어함으로써 최적의 부착률 및 균일성을 제어 할 수 있음을 나타낸다.

Fig. 10은 반응로 위의 입구에서 반응물질이 아래로 흐르는 3차원 수직형 축대칭 반응로에 대한 해석 결과이다. 공급되는 사일렌의 분압의 변화에 따라 반응면에 부착하는 실리콘의 부착률을 나타낸 것이다. 반응로 중심부( $r<25mm$ )에서는 반응로 위의 입구에서 균일한 속도로 공급된 가스가 정체되어 낮은 부착률을 나타내며,  $r=25mm$ 는 반응면과 상부 벽면사이의 채널이 형성되는 지점이며, 가속된 속도 증가에 의한 극대 부착률이 나타난다.  $r=25mm$  이후에서는 반응면에 충돌한 원료가스가 반경방향의 출구 쪽으로 진행하면서 경계층의 증가와 함께 가스 출구측의 반응면에서 낮은 부착률이 나타난다. 원료가스의 분압이 감소할수록 물 분율이 감소함에 따라 부착률은

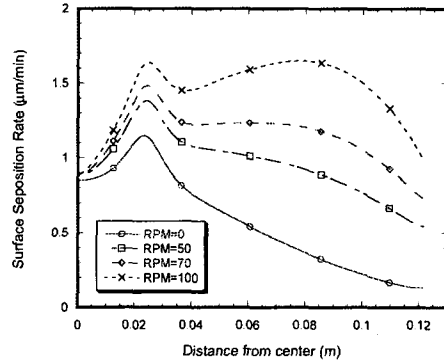


Fig. 11 Effect of susceptor rotation on the growth rate ( $u_{in}=0.3m/s$ ,  $P_{silane}=124.1Pa$ )

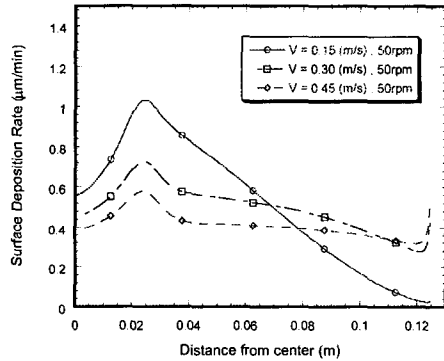


Fig. 12 Effect of inlet velocity for vertical CVD reactor (RPM=50,  $P_{silane}=124.1Pa$ )

감소하나, 균일성은 향상되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 반응면의 회전수가 부착률에 미치는 영향을 도시한 그림이다. 반응면이 회전함에 따라 회전 원판을 향해 견인된 가스가 반응면 주변(perimeter)으로 가속된 유동이 형성된다. 따라서 반응면 위의 경계층 두께가 감소하며, 반응율이 증가할 것이다.  $u_{in}=0.3m/s$ ,  $P_{silane}=124.1Pa$ 의 조건에서 회전이 없는 반응면 위의 부착률은  $r>20mm$ 에서 급격한 감소를 하나, 회전수가 증가함에 따라 출구측 반응면 위의 부착률이 현저하게 증가함을 알 수 있다. 회전수 70rpm인 경우  $r=40mm \sim 85mm$ 구간에서 균일한 부착률의 나타내고 있으며, 그 이상의 회전수(rpm=100)에서는 바람직하지 않는 출구 반응면의 부착률 증가가 나타난다.

Fig. 12는 반응로 위의 입구에서 균일한 속도로 공급된 가스의 입구속도가 부착률에 미치는 영향을 도시한 것이다. 원료가스인 사일렌의 량

을 일정하게 유지하고 수송가스의 량을 변화하여 입구속도를 조절하였다. 수송가스의 속도가 저속 ( $u_{in}=0.15\text{m/s}$ )으로 유입될 때 부착률은 반응면의 반경방향을 따라 감소하나, 가스속도가 증가함에 따라 반응면 출구부근의 부착률이 현저하게 증가하여,  $\text{rpm}=50$ ,  $u_{in}=0.45\text{m/s}$  일 때 균일한 부착률이 형성된다. 따라서 원료가스의 속도와 반응면의 회전수를 제어함으로써 최적의 균일성과 부착률을 갖는 박막성장이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수평 및 축 대칭 수직 반응로에서 가스의 층류, 열 및 물질전달에 대한 계산을 수행하였다. 사일렌으로부터 고온의 반응면에 부착하는 실리콘 박막 성장에 미치는 영향을 검토한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 수평인 반응면의 실리콘 부착률은 유입가스의 속도와 무관하게 유동방향을 따라 감소하며, 반응면의 길이에 비례하여 불균일하게 된다. 유입가스의 속도, 경사각 및 반응면의 길이가 증가할수록 반응면 뒷부분에서 부착률이 증가하였다. 본 연구에서 채택한 최대 반응면길이(750mm)에 대하여, 균일한 박막성장을 위한 적정 경사각 및 유입속도는 각각  $2.9^\circ$ ,  $0.11\text{m/s}$  이었다.

(2) 희석된 원료가스의 농도 증가에 따라 부착률은 증가하나 반응면 후반부의 불균일성이 증가한다.

(3) 반응면 위에 부착하는 실리콘의 부착률 분포는 Nusselt 수의 변화와 유사한 거동을 보인다.

(4) 축대칭 수직형 반응로에서 수송가스의 속도 및 반응면의 회전수 증가에 의해 출구부분의 부착률이 증가하였으며, 부착률의 불균일성 또한 개선되었다.

#### 참고문헌

- (1) Wang, C. A., Patnaik, S., Caunt, J. W. and Brown, R. A., 1988, "Growth Characteristics of a Vertical Rotating-disk MOVPE Reactor," *J. Crystal Growth*, Vol. 93, pp. 228-234
- (2) 오성진, 박경우, 김기문, 박희용, 1998, "수평 CVD 반응기에서의 3차원 혼합대류 열전달 특

성," 대한기계학회 논문집 B권, 제22권 제5호, pp. 672-684.

- (3) 이세영, 조형희, 이영원, 2000, "반도체 웨이퍼용 핫 플레이트 오븐에서 온도 균일도 향상을 위한 연구," 대한기계학회 2000년도 추계 학술대회 논문집 B권, pp. 261-266.
- (4) 조원국, 최도형, 김문언, 1998, "원통형 화학증착로에서 균일한 박막형성을 위한 입구 농도분포 최적화," 대한기계학회 논문집 B권, 제22권 제2호, pp. 173-183.
- (5) Jensen, K. F., Einset, E. O. and Fortiadis, D. I., 1991. "Flow Phenomena in Chemical Vapor Deposition of Thin Films," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 23, pp. 197-232
- (6) Evans, G. and R. Grief, 1937, "A Numerical Model of the Flow and Heat Transfer in a Rotating Disk Chemical Vapor Deposition Reactor," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 109, pp. 928-935
- (7) Chiu, W. K. S., and Jaluria, Y., 1998, "Heat and Mass Transfer in Continuous CVD Reactors," *Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 5, pp. 187-191.
- (8) Eversteyn, F. C., P. J. W. Severin, v.d. Brekel, C. H. J., and H. L. Peek, 1970, "A Stagnant Layer Model for the Epitaxial Growth of Silicon from Silane in a Horizontal Reactor," *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 117, pp. 925-931.
- (9) Kleijn, C. R., van der Meer, Th. H. and Hoogendoorn, C. J., 1989, "A Mathematical Model for LPCVD in Single Wafer Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 136, pp. 3423-3433.
- (10) Kleijn, C. R., 1991, "A Mathematical Model of the Hydrodynamics and Gas-phase Reactions in Silicon LPCVD in Single-Wafer Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, pp. 2190-2200.
- (11) Mahajan, R. L., 1996, "Transport Phenomena in Chemical Vapor Deposition Systems," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 28, pp. 339-415.
- (12) Fluent Inc., 1998, *Fluent User's Guide(V.5)*.
- (13) Chiu, W. K. S., and Jaluria, Y., 1997, "Heat Transfer in Horizontal and Vertical CVD Reactors," *HTD-Vol.347, National Heat Transfer Conference, ASME*, Vol. 9, pp. 293-311.