

CVD 반응기 내에서의 유동장에 대한 샤워헤드 지름의 영향에 대한 수치적 연구

김유재[†] · 김윤제^{*}

EFFECTS OF SHOWERHEAD DIAMETERS ON THE FLOWFIELDS IN A RF-PECVD REACTOR

You-Jae Kim[†] and Youn J. Kim^{*}

Key Words : Nusselt Number(Nusselt 수), PECVD reactor(플라즈마화학기상증착 반응기), Sherwood Number(Sherwood 수), Showerhead(샤워헤드), Susceptor(기판)

Abstract

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) process uses unique property of plasma to modify surfaces and to achieve the high deposition rates. In this study, a vertical thermal RF-PECVD (Radio Frequency-PECVD) reactor is modeled to investigate thermal flow and the deposition rates with various shapes of the showerhead. The showerhead in the CVD reactor has the shape of a ring and gases are injected in parallel with the susceptor, which is a rotating disk. In order to achieve the high deposition rates, we have simulated the thermal flow fields in the reactor with several showerhead models. Especially the effects of the number of injection holes and the rotating speed of the susceptor are studied. Using a commercial code, CFD-ACE, which uses FVM (Finite Volume Method) and SIMPLE algorithm, governing equations have been solved for the pressure, mass-flow rates and temperature distributions in the CVD reactor. With the help of the Nusselt number and Sherwood number, the heat and mass transfers on the susceptor are investigated. In order to characteristics of measure the flatness of the layer, furthermore, the relative growth rate (RGR) is considered.

기호설명

c_p 정압비열

D_{AB} 확산계수

E_c Eckert 수 = $U_c^2 / c_{p,i} \Delta T$

Ga Gay-Lussac 수 = $\Delta T / T_{in}$

Gr Grashof 수 = $g R_c^3 \Delta \rho / \rho_c \nu_c^2$

k 열전도 계수

Nu Nusselt 수

P 압력

Pr Prandtl 수 = ν_i / α_i

R_c 회전기판 반경

Re Reynolds 수 = $W_c R_c / \nu_c$

Re_c 유효 Reynolds 수

$$U_c R_c / \nu_c = \left(Re^2 + Re_\Omega^2 \right)^{1/2}$$

Re_Ω 회전 Reynolds 수

$$= Re_c^2 \Omega / \nu_c$$

[†] 성균관대학교 기계공학부 대학원

E-mail : youjaekim@hanmail.net

TEL : (031)290-7495 FAX : (031)290-5849

^{*} 성균관대학교 기계공학부

R_g	기체상수
r, z	무차원 원통좌표계 $= (R, Z)/R_0$
Sc	Schmidt 수 $= \nu_c / D_{AB,c}$
Sh	Sherwood 수
T	온도
ΔT	온도차 $= (T_s - T_{in})$
u, v, w	무차원 반경, 접선, 축방향 속도 요소 $= (U, V, W)/U_c$
그리스 문자	
α_T	열확산계수
ρ	반응가스의 밀도
μ	반응 가스의 동점성 계수
ϕ	종(species) 질량
Ω	회전기판의 회전율
τ	시간
하첨자	
in	입구
s	회전 기관(susceptor or substrate)

1. 서론

화학 기상 증착법(Chemical Vapor Deposition; CVD)은 기체원료로부터 화학반응을 거쳐 박막이나 입자 등의 코팅막을 형성하는 중요한 공정 중의 하나이다. 균일한 박막을 얻기 위해 플라즈마 CVD 반응기 내에 반응기체의 균일한 분사를 위한 샤워헤드를 장착하거나 증착 기관(susceptor)을 회전시키기도 한다. 특히 반응기의 입구에서 기관 표면까지의 기체 수송 현상은 증착의 성공을 가름하는 중요한 요건이 되기도 한다.

일반적으로 기체의 유동형태와 증착물은 반응기 형상, 샤워헤드 형상, 열유동 조건, 작동 과정 및 순차 제어 등의 영향을 받는다. 특히 유동 조건에 따라 증착물이 달라진다는 점은 주목할 만하며 그 중요성 때문에 이에 대한 많은 연구들이 수행되었다. 하지만 그 대부분은 종종 부력효과를 무시하는 등으로 지나치게 간략화되었거나 샤워헤드를 고려하지 않은 고정된 형상에 한정되었다.

실리콘 증착을 위한 CVD 반응기가 1970 년대에 자연대류를 고려한 비압축성 유동함수 와도 공식

을 통해 처음 시작된 후로, 지난 이십여년 동안 회전 원판 CVD 반응기에 대한 연구가 다수 이루어졌다. 이에 불필요한 문헌의 나열을 피하면서 본 연구와 밀접하게 관계된 연구 성과들만 간략히 언급하겠다.

가장 단순화된 해석은 다양한 유체역학적 문제에서 사용된 상사 모델일 것이다.^(1,2) 몇가지 경우에서 회전 원판 위의 유동이 1 차원이기 때문에, 유사한 해석들은 가정된 해를 얻기 위한 유용한 도구가 되었다. Evans 와 Grief⁽³⁾은 약한 부력 효과에서의 1 차원 유사해가 2 차원 계산 결과들과 유사하다고 결론을 내렸다. 뒤에 Ohimine 등⁽⁴⁾이 압축성 상사 모델을 사용하여 빠른 회전 원판의 반응기에서의 AlGaInP 판막 증착물의 추정값을 구하였다. Soong 등⁽⁵⁾은 Nusselt 수와 Sherwood 수를 이용하여 기체 유동장, 온도장 및 농도장에 대한 기관 회전의 영향과 열유동 조건에 대해 연구하였다. 또, Biber 등⁽⁶⁾은 지름이 20~76 mm 인 기관에서의 유동 가시화 연구 결과에 기초한 열 및 회전 유동 변수들을 사용하여 부력 유동, 플러그 유동 및 회전 유발 유동 형태에 대해 분류하였다. Sansonnens 등⁽⁶⁾은 RF 플라즈마 증착용 대면적 샤워헤드 반응기에서의 기체 유동의 균일성에 대해 수치적으로 연구하였다.

본 연구에서는 수직의 원통형 RF-PECVD (Radio Frequency-PECVD)에 장착된 샤워헤드의 지름과 기관의 회전수에 따른 반응기 내부의 열유동과 증착물에 관해 수치적으로 고찰하고자 한다. 높은 증착물을 얻는데 필요한 유동 형태를 연구하기 위해 샤워헤드의 분사 구멍의 지름과 반응 기관의 회전 속도를 변화시키며 반응기의 열유동을 수치적으로 고찰하였다. 수치해석을 위해 유한 체적법(FVM)과 SIMPLE 알고리즘을 사용하는 CFD-ACE 를 이용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 물리적 모델과 지배 방정식

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 RF-PECVD 반응기의 개략도 및 격자계를 나타낸다. Ω 로 회전하는 기관의 지지대 중심점이 원통 좌표계(R, θ, Z) 원점에 놓여져 있다. 원통형인 반응기의 반지름은 R_C 이며 높이는 Z_0 이다. 회전 기관의 반지름은 R_S 이며 두께는 t_s 이다. 반응기체인 H_2 가 반지름이 R_m 인 유입구를 통해 W_m 의 속도로 반응기 내로 유입된다. Fig. 1(c)는 CVD 반응기 내의 32 개의 분사구를 갖는 샤워헤드를 나타낸다. 각각의 분사

구의 지름은 D_H 이고, 유입 기체는 원형 샤워헤드의 안쪽과 바깥쪽으로 기관과 평행하게 분사된다.

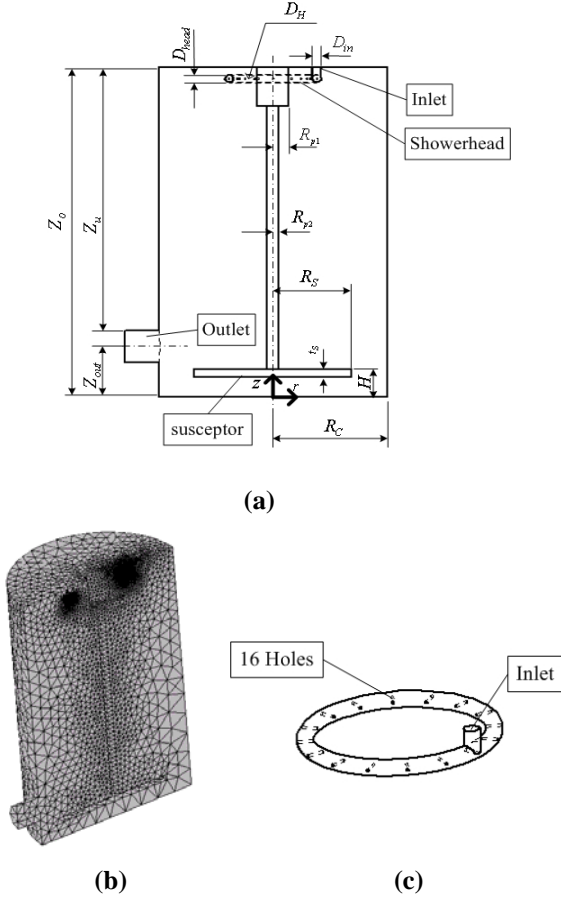


Fig. 1 Schematic diagram of RF-PECVD reactor (a) geometry: $D_{in} = D_{head} = 6.6$ mm, $R_s = 69$ mm, $R_c = 100$ mm, $Z_o = 300$ mm, $Z_u = 240$ mm, $Z_{out} = 31.2$ mm, $R_{p1} = 10$ mm, $R_{p2} = 5$ mm, $t_s = 6$ mm, $H = 25$ mm, (b) unstructured grid system, and (c) showerhead.

반응기 내의 유동은 층류, 정상상태, 그리고 축대칭으로 가정하며, 점성 소산(viscous dissipation)은 엔탈피 변화에 비하여 무시한다. 그리고 확산에 의한 상호 영향(Soret and Dufour effects) 역시 무시한다.

본 연구에서는 해석의 편의성을 도모하기 위해 무차원 변수를 이용하여, 연속 방정식, 운동량 방정식 및 열 및 종 방정식을 나타내었다.

연속 방정식 :

$$\frac{\partial \rho^*}{\partial \tau} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* r u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho^* w) = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho^* u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* r u u) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho^* w u) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}_c} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu^* r \left(2 \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right] - \frac{\mu^*}{r} \left[2 \left(\frac{u}{r} \right) \right] \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^* \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{\rho^* v^2}{r} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho^* v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* r u v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* w v) \\ &= \frac{1}{\text{Re}_c} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu^* r^2 \left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) \right) \right] \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^* \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \right\} - \frac{\rho^* u v}{r} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho^* w) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* r u w) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho^* w w) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re}_\tau} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu^* r \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu^* \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \right\} + \frac{Gr}{\text{Re}_c^2} \left(\frac{1 - \rho^*}{1 - \rho_s} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

에너지 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho^* c_p \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* c_p r u \theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho^* c_p w \theta) \\ &= \frac{1}{\text{Pr Re}_c} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k^* r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k^* \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \\ & \quad + Ec \left(u \frac{\partial p}{\partial r} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

종(species) 보존 방정식 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho^* \phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho^* r u \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho^* w \phi) \\ &= \frac{1}{\text{Sc Re}_c} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho^* D_{AB}^* r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho^* D_{AB}^* r \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\rho^* D_{AB}^* \alpha_T r \frac{\phi}{\theta + Ga^{-1}} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho^* D_{AB}^* \alpha_T \frac{\phi}{\theta + Ga^{-1}} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 하첨자 c 는 참조 상태량을 나타낸다. 또한 밀도는 일정한 기체 상수 R_g 를 갖는 이상기체 방정식 $\rho = PM / R_g T$ 로 계산할 수 있으며, 점성계수 μ , 열전도율 k , 비열, 확산계수 D_{AB} 및 열확산계수 α_T 와 같은 유체의 다른 상태량들은 CVD

핸드북의 관계식을 참고하였다.⁽⁵⁾

2.2 경계 조건

- 1) 입구조건 ($z = L + L'$): $w = Re/Re_c$,
 $u = v = 0, \theta = \theta_{in}, \phi = 1$
- 2) 회전중심축 ($r = 0$): $u = 0, \partial\phi/\partial R = 0$
- 3) 회전원판 ($z = H$): $u = w = 0$,
 $v = (Re/Re_c)R/R_c, \theta = \theta_w$,
 $\hat{n} \cdot \left\{ \nabla\phi + \alpha_T \phi \nabla \left[\ln(\theta + Ga^{-1}) \right] \right\} = 0$
- 4) 벽면조건 : $u = w = 0, v = (Re/Re_c)R/R_c$,
 $\theta = \theta_w, \hat{n} \cdot \left\{ \nabla\phi + \alpha_T \phi \nabla \left[\ln(\theta + Ga^{-1}) \right] \right\} = 0$
- 5) 출구조건 ($z=0$): $\partial\phi/\partial\hat{n} = 0$ (7)

여기서 ϕ 는 v, w, θ 및 ϕ 와 같은 각각의 변수를 나타내며, n 은 고체벽면(solid-wall)에 수직한 단위벡터를 표시한다.

2.3 열 및 물질전달율과 박막성장률(RGR)

기관위의 열 및 물질 전달율은 다음과 같이 정의된다.

$$Nu = -k^* \left[\frac{\partial\theta}{\partial Z} \right]_s, \quad Sh = D_{AB}^* \left[\frac{\partial\phi}{\partial Z} \right]_s \quad (8)$$

여기에서 Nu 와 Sh 는 각각 Nusselt 수와 Sherwood 수를 나타내며, Nusselt 수와 Sherwood 수가 증가할수록 열 및 물질 전달이 더 빠르게 일어난다.^(8, 9) 만약 기관 표면에서 반응물질이 매우 빠르게 반응한다면, Sherwood 수로 박막 성장률(relative growth rate; RGR)을 정의할 수 있다.⁽⁵⁾

$$RGR = \frac{Sh}{Sh_{r=0}} \quad (9)$$

여기서 하첨자 $r=0$ 은 회전 원판 지지대의 중심점에서의 값을 말하며, RGR 은 박막의 균일한 정도를 알 수 있는 척도가 된다.

3. 수치 해석

상용 코드 CFD-ACE⁽¹²⁾를 이용하여 비선형 방정식 (1)-(6)과 방정식 (7)에서의 경계조건은 SIMPLE 알고리즘으로 해석하였다.^(10, 11) 변수 U, V, W, P, θ 및 ϕ 에 대해 잔여분이

$$\varepsilon = \frac{|\phi_{ij}^{n+1} - \phi_{ij}^n|}{(\phi_{\max} - \phi_{\min})} \leq 10^{-6}$$

이 되면 최종 수렴된 유동장 및 온도장의 해를 구하였다. 격자계산은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 비결정격자 879,051 개를 생성하여 샤워헤드와 기관 주위에 집중 배치하였으며, CPU 1GHz 인 PC 에서 약 12 시간의 계산 시간이 소요되었다.

Table 1 Non-dimensional parameters and variables

$P_c = \rho_c U_c^2$	$\Delta T = T_s - T_{in}$	$\Delta\rho = \rho_{in} - \rho_s$
$R_{in} = D_{in}/2$	$u = U/U_c$	
$v = V/V_c$	$w = W/W_c$	$\mu^* = \mu/\mu_c$
$k^* = k/k_c$	$\theta = (T - T_{in})/\Delta T$	
$\rho^* = \rho/\rho_c$	$c_p^* = c_p/c_{p,c}$	
$D_{AB}^* = D_{AB}/D_{AB,c}$	$R_H = D_H/2$	
$Ga = \Delta T/T_{in}$		Gay-Lussac 수
$Pr = \nu_c/\alpha_c$		Prandtl 수
$Sc = \nu_c/D_{AB,c}$		Schmidt 수
$Gr = gR_c^3 \Delta\rho/\rho_c \nu_c^2$		Grashof 수
$E_c = U_c^2/c_{p,c} \Delta T$		Eckert 수
$Re = \bar{W}_c R_c/\nu_c$		Reynolds 수
$Re_c = (Re^2 + Re_\Omega^2)^{1/2}$		유효 Reynolds 수

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 CVD 반응기 내로 유입되는 반응 기체인 H_2 의 주입 유량을 50 SCCM 으로 유지하였고, 이 때의 CVD 내의 압력, 온도, 기관 표면의 온도, CVD 벽면의 온도는 각각 $P_{in}=0.1atm, T_{in}=273.15K, T_s=773.15K$ 및 $T_w=373.15K$ 으로 일정하게 하였다.

4.1 샤워헤드 분사구 지름의 변화

먼저 기관의 회전을 0 rpm 으로 고정하고, 샤워헤드의 분사구 지름 D_H 를 1, 1.5, 2, 2.5 및 3 mm 로 변화시켰다. 회전 기관 표면에서의 열 및 물질

전달 특성에 관한 그래프가 Figs. 2 와 3 에 도시되었다. 기판 위의 Nusselt 수와 Sherwood 수는 전체 영역에서 비슷한 경향을 보이며 급격히 상승하는 경향을 보이는데, 이는 기판 온도 영향으로 부력에 의한 유동(buoyancy-dominant flow)이 나타나고 있음을 의미한다.^(4,11) 부력에 의한 유동은 유입 기체를 방해하기 때문에, 대부분의 기체는 기판 표면까지 도달하지 못하고 반응기 벽을 따라 출구로 직접 이동한다. 따라서 부력에 의한 유동이 지배하는 영역에서는 열 및 물질 전달이 매우 좋지 않다.

이와 같은 부력에 의한 유동의 영향 때문에 Figs. 2 와 3 에서 열 및 물질 전달을 나타내는 그래프의 곡선들이 박막 성장률(RGR)을 평가할 수 있을 정도의 충분한 의미를 갖는다고 하기는 어렵다. 그런데 샤워헤드의 지름이 1.5 mm 인 경우의 Nusselt 수와 Sherwood 수가 전체적으로 다른 지름의 경우보다 크게 나타남을 확인할 수 있으며, 이는 이 경우가 열 및 물질 전달이 더 활발하게 일어나 증착에 유리함을 의미한다. 따라서 샤워헤드의 최적 지름은 1.5 mm 라고 할 수 있다.

4.2 기판의 회전수 변화에 따른 고찰

샤워헤드 지름을 1.5 mm 로 일정하게 유지하고, 기판의 회전수를 300 rpm 으로 증가시켰다. Figs 4 와 5 에서 보는 바와 같이 부력에 의한 유동이 사라지면서 Nusselt 수와 Sherwood 수는 점차적으로 증가하는 경향을 보이는데, 이와 같은 영역을 plug 유동이라고 한다. 일반적으로 부력에 의한 유동은 부력에 의해 반응물이 순환을 하면서 화학반응을 하고 반응물들이 중력에 의해 회전 기판 표면 위로 곧바로 떨어지기 때문에, CVD 공정에서 악영향을 미친다.

회전수를 600 rpm 으로 증가시키면, 회전 유발 유동(rotation-induced flow)의 영역이 나타나는데 이 영역에서는 회전 원판 모서리 부근에서 Nu 수와 Sh 수는 잠시 감소하다 급격히 증가한다.⁽⁵⁾ 따라서, 회전 유발 유동에서의 열 및 물질 전달은 기판의 모서리를 제외한 나머지 영역에서 균일한 박막을 형성하기에 만족스럽다고 할 수 있다. 회전수 변화에 따른 기판 표면에서의 RGR 값을 Fig. 6 에 나와있다. RGR 값이 1 에 가까울수록 기판 중심과 바깥지름 사이의 열 및 물질 전달의 차이가 작다는 것을 의미하며, 박막의 편차가 작다는 것을 의미한다.

회전수가 증가함에 따라, 박막 역시 두껍게 성장한다. 만약 RGR 곡선이 위의 조건과 일치하고,

기판 위에서 부분적인 두꺼운 층이 줄어든다면, CVD 공정에서도 매우 유용하다. 따라서, 유입 기체가 Q=500 SCCM 으로 유입될 경우, 기판의 회전 속도 Ω=500 rpm 및 샤워헤드 지름 DH=1.5 mm 일 때, 균일한 박막을 형성하기에 적합한 조건이라고 할 수 있다.

5. 결론

CVD 반응기의 샤워헤드의 지름과 기판의 회전율이 열 및 물질전달 및 박막 균일도에 영향을 미침을 알 수 있었다. 부력에 의한 유동, plug 유동, 회전 유발 유동을 확인할 수 있었으며, RGR 값을 통해 박막의 균일도를 알 수 있었다. 또한, 부력에 의한 유동 및 회전 유발 유동은 기판의 회전율로 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다.

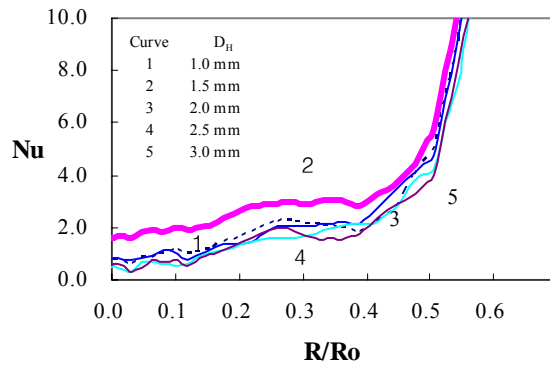


Fig. 2 Distribution of on local heat transfer rate with different injection hole diameter for Ω=0 rpm.

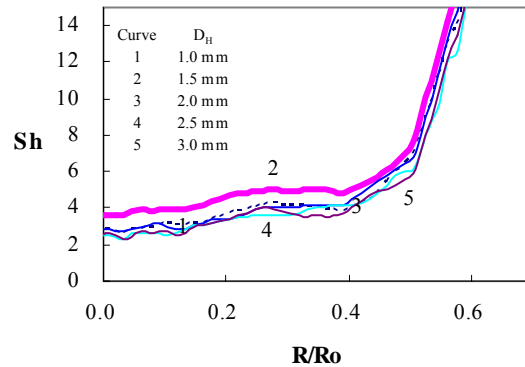


Fig. 3 Distribution of on local mass transfer rate with different injection hole diameter for Ω=0 rpm.

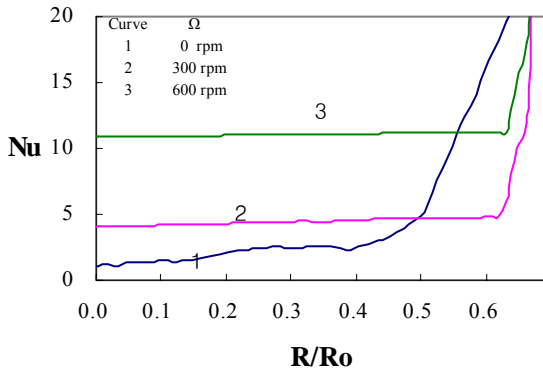


Fig. 4 Distribution of local heat transfer rate with different rotational velocities of the susceptor for $\Omega = 0 \text{ rpm}$.

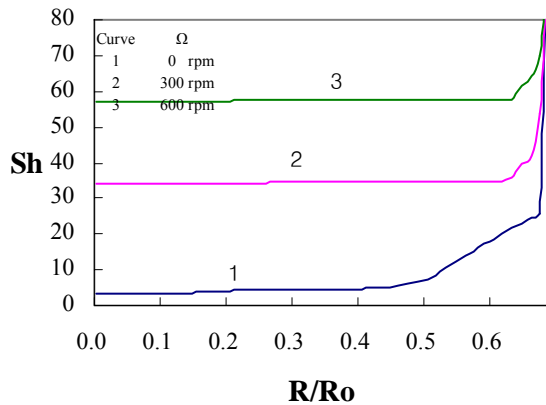


Fig. 5 Distribution of local mass transfer rate with different rotational velocities of the susceptor for $\Omega = 0 \text{ rpm}$.

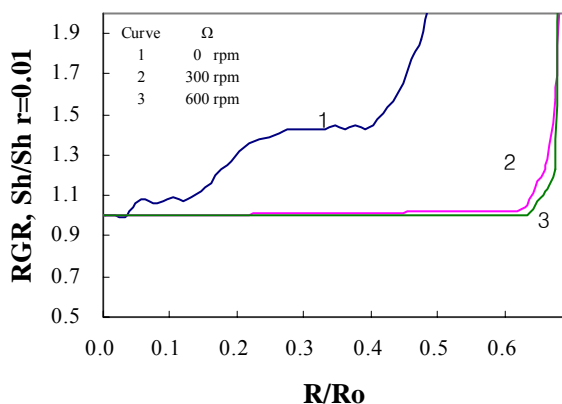


Fig. 6 Relative growth rates of epitaxy with different rotational velocities of the susceptor for $Q=50 \text{ SCCM}$.

후 기

본 연구는 한국과학재단(ERC 2000)지정 “플라즈마 응용 표면기술 연구센터(CAPST)”의 지원하에 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다

참고문헌

- (1) Patnaik, S. and Brown, R. A., 1989, *Hydrodynamic dispersion in OMVPE reactor: Numerical simulation and experimental measurement*, Journal of Crystal Growth, Vol. 96, pp. 153~174
- (2) Kleijin, C. R., 1991, *A mathematical model of the hydrodynamics and gas-phase reactions in Silicon LPCVD in a single-wafer reactor*, Journal of Electrochemical Society, Vol. 138, No. 7, pp. 2190~2200.
- (3) Evans, G. H., Grief, R., 1988, *Forced flow near a heated rotating disk: A similarity solution*, Numerical Heat Transfer, Vol. 14, pp. 373~387.
- (4) Ohmine, T., Kotaoka, K. and Sato, Y., 1990, *Growth of AlGaInP in a high-speeds rotating disk OMVPE reactor*, Journal of Electronic Materials, Vol. 19, No. 5, pp. 429~433.
- (5) Soong, C.Y., Chyuan, C.-H. and Tzong, R.-Y., 1988, *Thermo-Flow Structure and Epitaxial Uniformity in Large-Scale Metalorganic Chemical Vapor Deposition Reactors with Rotating Susceptor and Inlet Flow Control*, Japanese Journal of Applied Physics, Vo. 37 Part 1, No. 10, pp. 5823~5834.
- (6) Biber, C. R., Wang, C. A. and Motakef, S., 1992, *Flow regime map and deposition rate uniformity in vertical rotating-disk OMVPE reactors*, Journal of Crystal Growth, Vol. 123, pp. 545~554.
- (7) Sansonnens, L., Howling, A. A. and Hollenstein, Ch., 2000, *A gas flow uniformity study in large-area showerhead reactors for RF plasma deposition*, Plasma Sources Sci. Technol, Vol. 9, pp. 205~209.
- (8) White, F. M., 1991, *Viscous Fluid Flow,* 2nd ed., McGraw-Hill
- (9) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2002, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 5th ed.*, John Wiley & Sons
- (10) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Taylor & Francis
- (11) Versteeg, H. K. and Malalasekera, W., 1995, *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*, Prentice Hall
- (12) CFD Research Cooperation, 2003, *CFD-ACE Theory manual V2003*, CFDRC Corporation.