

수평 CVD 반응기에서의 3차원 혼합대류 열전달 특성

오성진* · 박경우** · 김기문*** · 박희용****

(1997년 11월 14일 접수)

Three-Dimensional Mixed Convection Heat Transfer Characteristics in Horizontal Chemical Vapor Deposition Reactor

Sung-Jin Oh, Kyoung-Woo Park, Ki-Moon Kim and Hi-Yong Pak

Key Words : Curvilinear Coordinate(곡선 좌표계), CVD(화학증착법), Three-Dimensional Mixed Convection(3차원 혼합대류), Transversal Roll(횡방향 회전)

Abstract

The three dimensional mixed convection heat transfer characteristics in an idealized horizontal CVD reactor with a tilted susceptor is investigated numerically. The governing equations are transformed into a general curvilinear systems. For computing fluid flow and heat transfer in a irregular shaped domain, the SIMPLE algorithm is extended to the present curvilinear coordinate, and a nonstaggered grid system is adopted. The Cartesian velocity components are used as the dependent variables in the momentum equations. The effects on heat transfer rate uniformity of the susceptor are investigated for various input flow rate and channel height. Furthermore the formation of return flow induced by transversal rolls is studied as a function of dimensionless parameters; the Grashof number Gr and the Reynolds number Re . The existence of return flows leads locally large heat transfer rates, but is not good for the uniformity of the susceptor. The effects of tilted susceptor lead improvement of heat transfer and heat flux uniformity in the main flow direction because thermal boundary layer is retarded.

기 호 설 명

c_p : 유체의 정압비열 ($J \text{ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	L_2 : 채널의 반응영역 길이 (m)
\bar{c}_p : 무차원 정압비열 ($= c_p / \bar{c}_p$)	L_3 : 채널의 출구영역 길이 (m)
g : 중력 가속도 (ms^{-2})	Nu : Nusselt수
Gr : Grashof수 ($= \{ (g\rho_f^2 H^3 (T_h - T_c)) / (\mu_f^2 T_f) \}$)	p_0 : 대기압 ($= 101.3 \text{ kPa}$)
H : 채널의 높이 (m)	\bar{P} : 무차원 압력 ($= (p + \rho_0 g y) / (\rho_f w_0^2)$)
k : 열전도율 ($W \cdot \text{cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Pr : Prandtl수 ($= (\mu_f c_{p,f}) / k_f$)
\bar{k} : 무차원 열전도율 ($= k / k_f$)	Ra : Rayleigh수 ($= Gr \times Pr$)
L_1 : 채널의 입구영역 길이 (m)	Re : Reynolds수 ($= (\rho_f w_0 H) / \mu_f$)
	r_T : 무차원 온도차 ($= (T_h - T_c) / T_c$)
	T : 절대온도 (K)
	T_h : 가열부 (susceptor) 온도 (K)
	T_c : 입구 온도 (K)
	\bar{T} : 무차원 온도 ($= (T - T_c) / (T_h - T_c)$)

*회원, 포스코개발

**회원, LG산전 빌딩시스템연구소

***회원, 한양대학교 대학원

****회원, 한양대학교 기계공학부

- u, v, w : 직교좌표계에서의 속도 ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$)
 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$: 무차원 속도 ($=u/w_0, v/w_0, w/w_0$)
 W : 채널의 폭 (m)
 x, y, z : 직교좌표계
 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$: 무차원 직교좌표계 ($=x/H, y/H, z/H$)

그리스문자

- μ : 유체의 점성계수 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{sec}^{-1}$)
 $\bar{\mu}$: 무차원 점성계수 ($=\mu/\mu_f$)
 ρ : 유체의 밀도 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
 $\bar{\rho}$: 무차원 밀도 ($=\rho/\rho_f$)
 ξ, η, ζ : 일반좌표계

하첨자

- 0 : 채널입구
 f : 막온도에서의 값
 \max : 최대값
 \min : 최소값

1. 서 론

반도체 제작공정에서 폭넓게 사용되는 화학증착법(Cheical Vapor Deposition)은 반응물질을 포함한 가스를 유도전류로 가열되는 반응부(susceptor)를 통과시켜 웨이퍼와의 물질전달을 통하여 박막을 형성하는 방법이다. 이러한 화학증착공정에서 반응기의 기하학적 형상, 가스의 유량 및 속도 분포, 열적 경계조건, 반응가스의 성분 등의 매개변수들은 증착되는 막의 균일성과 성장률에 큰 영향을 미친다. 따라서 웨이퍼의 증착률과 수율을 높이기 위해서는 CVD반응기의 물리적현상 규명을 통한 매개변수들의 최적운전조건을 구하는 것이 필수적이다.

일반적인 수평CVD 반응기의 구성은 수평채널내에 가열되는 반응부(susceptor)와 반응 영역 앞에 반응물의 침전을 막기 위해 냉각된 입구 부분으로 되어 있다. 이러한 반응기 내부의 큰 온도변화로 인한 밀도차이로 2차유동이 발생하게 되고 주유동과의 상호작용으로 복잡한 유동특성을 갖게 된다. 부력은 채널의 단면에서 2차 유동 및 주유동방향의 역류를 유발하고 이는 열전달과 유체마찰을 증가시키며 따라 표면에서의 열전달에 영향을 미치게 된다. Fig. 1(a)에서 보듯이 단면에서 2차유동을 유발시키는 종방향 회전은 Re 와는 무관하게 1708로

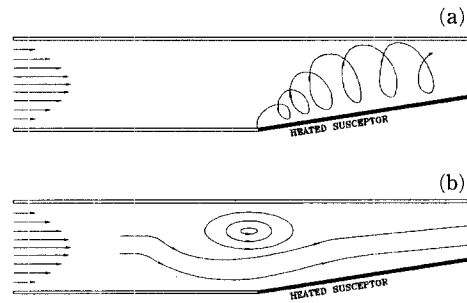


Fig. 1 Longitudinal and transversal rolls; (a) Longitudinal rolls : axes in the main flow direction. (b) Transversal rolls : axes in cross stream direction.

알려진 임계 Ra 이상의 유동조건에서 나타나게 된다. Fig. 1(b)의 주유동방향으로 역류를 유발하는 횡방향 회전은 Re 의 함수로 표현되는 또 다른 임계 Ra 에 의존한다. 이러한 부력에 의한 회전의 상호작용은 유동과 열(물질)전달 특성을, 특히 웨이퍼의 열 유속 및 종의 질량 유속분포를 크게 바꾸어 놓을 수도 있고 이것이 CVD 장치에서 막 두께와 구성의 균일성을 결정 지워 주는 중요한 판단 요소가 된다고 할 수 있다. 보통 CVD공정에서 가스의 유동특성은 층류이며 강제대류와 자연대류가 동시에 발생하는 혼합대류열전달이다. Houtman 등⁽¹⁾과 van de Ven 등⁽²⁾의 연구에 의하면 많은 CVD공정에서 열전달과 유동특성은 화학반응 및 물질전달과 분리하여 단일종의 보온방정식의 지배를 받는 것으로 생각할 수 있으며, 증착과정이 기체상태에서의 대류와 확산과정으로 제한될 경우 열전달과 물질전달의 상사성이 유효하게 되며, 증착과정의 균일성과 성장률은 가스의 열전달특성과 직접 관계가 있다고 할 수 있다. 따라서 CVD반응기 설계에 있어서 반응기 내부의 혼합대류 열전달 특성을 규명하는 것이 먼저 선행되어야 한다.

최근에는 전산 유체역학의 발달로 실제 CVD공정과 가깝게 수치모사를 수행하는 연구가 많이 진행되고 있다. Karki 등⁽³⁾은 주유동방향으로 비균일 온도조건을 갖는 수평 반원관에서 Boussinesq 가정 하에 층류혼합대류 열전달을 해석한 결과, 곡면벽의 열경계조건이 2차유동 형태에 중요한 영향을 미치며 평면벽의 열유속분포에도 영향을 준다고 하였다. Evans 등⁽⁴⁾은 수평채널에서 3차원 비정상 혼합대류 열전달특성을 연구한 결과 CVD운전조건에서 열적 불안정성이 시간의존적으로 큰 온도구배

를 형성하는 것을 규명하였다. Ouazzani 등⁽⁵⁾은 기울어진 반응부를 채용한 CVD에서 포물형가정을 통한 행진기법으로 열 및 유동특성을 해석한 결과, 반응부의 경사각도에 따른 최적의 증착균일성을 갖는 가스의 유입유량을 구하였다. 혼합대류 열전달에서 Gr 와 Re 의 비는 부력의 정도를 나타내는 중요한 매개변수가 되며 Visser 등⁽⁶⁾은 작은 Re (< 10)에 대하여 다양한 실험 및 수치해석을 통하여 역류가 발생하는 Gr 와 Re 의 비에 대한 임계값을 결정하였다.

실제의 화학증착공정은 고온의 가스에 의한 혼합대류유동과 열전달, 물질전달이 상호 연관된 3차원적인 특성을 갖는다. 이제까지의 수치모사를 통한 연구는 이러한 물리적으로 복잡한 현상들 때문에 2차원으로 근사시키거나, 횡방향 회전을 무시한 포물선형 유동으로 가정 등을 통하여 수치적 어려움을 해결하였으며, 반응기에 기하학적 형상의 다양성을 부여하지 못하고 주로 일정단면의 사각채널에 한정된 경우가 많다. 그러나 열적 경계조건이 균일하지 않기 때문에 유동방향으로의 역류를 유발하는 횡방향 회전이 존재하는 수평CVD 반응기 내부의 혼합대류 유동에서는 일반적으로 채널내부 유동해석에 사용되는 포물형 유동 가정을 통한 행진기법이 타당하지 않다. 또한 웨이퍼가 있는 반응부와 유입되는 가스의 온도차이가 크기 때문에 부력항에 대한 Boussinesq가정이 유효하지 않게 되고 밀도를 포함한 유동 및 열전달 물성치가 온도에 종속되는 유동특성을 갖는다. 따라서 이 연구에서는 앞서 언급한 특성들을 고려하여 3차원 비정규형상(irregular shape)인 기울어진 susceptor를 갖는 수평CVD 반응기에서의 유동 및 열전달특성을 수치적으로 규명하고자 하였다. 이를 위하여 지배방정식을 곡선좌표계로 변환하였으며, SIMPLE 알고리즘을 수정, 확장하여 유동장을 해석하였다. 이때, 비엇갈림격자계를 적용하였으며 직교직각 속도성분을 주중속변수로 사용하였다. 이상의 수치해석기법을 이용하여 입구유량, 채널높이 및 susceptor의 경사각도에 따른 반응부에서의 열유속분포를 규명하고자 하였으며, 또한 열전달 균일성에 중요한 인자로 작용하는 횡방향 회전이 발생하는 경우 대한 Gr 와 Re 의 함수관계를 조사하였다.

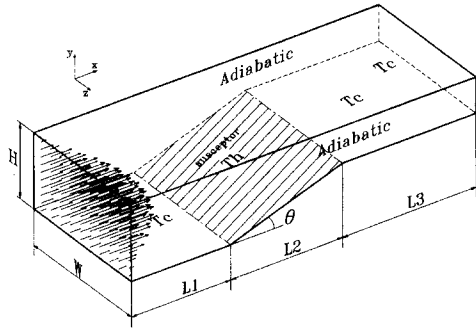


Fig. 2 Schematic diagram for 3-D CVD model.

2. 이론적 연구

2.1 해석모델

이 연구에서 채택한 계산모델의 기하학적 형상은 Fig. 2와 같이 CVD반응기를 기울어진 고온부를 갖는 3차원 수평채널로 모델링하였다. 채널은 Fig. 2에서 보듯이 입구영역과 출구영역, 그리고 반응영역으로 구분할 수 있다. 채널의 높이 H 는 보통 수 cm이고 길이 L 은 1m정도이고 폭 W 는 대략 10 cm내외이다. 반응이 일어나는 채널 밑면의 온도 T_s 는 1000-1300K의 범위이다. 반응물을 수송하는 기체로는 수소, 헬륨, 질소 같은 불활성가스가 사용되며 채널로 유입되는 가스의 평균속도는 20cm/s 미만이다. 반응부는 보통 θ 의 각도로 기울어져 있으며 이것은 유동단면의 감소로 인한 유속 증가로 경계층의 성장을 지연시킴으로써 유동방향을 따라 반응부의 온도분포를 균일하게 하기 위한 것이다. 이 연구에서는 경사각 θ 를 0°, 5°, 10°로 변화시키면서 계산하였고, 채널 입구의 종횡비(W/H)는 2, 채널 출구의 종횡비는 경사각 θ 에 따라 변하게 되며, 입구길이 L_1 과 반응부 길이 L_2 , 출구길이 L_3 는 각각 $3H$, $3H$, $4H$ 로 선정하였다. 특히, 그림에서 보듯이 채널의 너비방향(z -방향)으로는 기하학적 특성 및 물리적인 상태량이 그 중심에 대하여 대칭이므로 계산영역을 반으로 잡아 수치해석을 하였다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

3차원 정상상태, 층류유동에 대한 혼합대류유동장의 지배방정식을 일반변수 ϕ 로 표현하면 다음과 같다.

Table 1 Diffusion coefficient and source terms appearing in governing equation.

ϕ	Γ^ϕ	S^ϕ
u	μ	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}$ $+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right)$
v	μ	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}$ $+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \rho g$
w	μ	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}$ $+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right)$
h	$\frac{k}{c_p}$	

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S^\phi \quad (2)$$

$$\rho = \frac{p_0}{RT} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, u , v , w 는 각각 직교직각좌표계에서의 속도를 나타낸다. 식 (2)는 ϕ 에 들어가는 종속변수에 따라 운동량, 에너지방정식의 나타낸다. Table 1에 식 (2)에 사용되는 확산계수 Γ^ϕ 와, 생성항 S^ϕ 가 주어져 있다. 에너지방정식에서 점성소산과 압축효과는 무시하였다. 채널 내부의 온도변화가 크기 때문에 밀도에 대한 Boussinesq 가정이 타당하지 않게 되고 밀도를 포함한 물성치들이 온도에 따라 크게 변하게 된다. 밀도를 구하기 위하여 식 (3)과 같은 이상기체 상태방정식을 사용하였으며, 식 (2)에 사용되는 유입가스의 물성치 μ , k , c_p 는 온도 종속성을 고려하여 각각 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.⁽⁶⁾

$$k = c_1 T^{0.8}, \quad \mu = c_2 T^{0.7}, \quad c_p = c_3 T^{0.1} \quad (4)$$

여기서 c_1 , c_2 , c_3 는 유입가스의 종류에 따라 결정되는 상수이다.

이 연구에서 고려한 CVD반응기에서의 혼합대류 열전달은 입구속도 w_0 , 입구온도 T_c , 반응부 온도 T_h , 채널의 높이 H , 반응부 경사각 θ 와 유입가스

종류의 6가지 매개변수에 의해 결정되어진다. 매개변수의 수를 줄이기 위해 식 (1)~(4)를 입구속도 w_0 , 온도차 $T_h - T_c$, 채널높이 H 를 사용하여 무차원화 시키면 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} (\tilde{\rho} \tilde{u}_i) = 0 \quad (5)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} (\tilde{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} \left\{ -\tilde{P} \delta_{ij} + \tilde{\mu} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial \tilde{x}_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial \tilde{x}_i} \right) - \frac{2}{3} \tilde{\mu} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial \tilde{x}_k} \delta_{ij} \right\} + \frac{Gr}{Re^2} \tilde{T} \frac{(0.5r_T + 1)^2}{Tr_T + 1} \delta_{2j} \quad (6)$$

에너지방정식

$$\frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} (\tilde{\rho} \tilde{c}_p \tilde{T} \tilde{u}_i) = \frac{1}{RePr} \frac{\partial}{\partial \tilde{x}_i} \left(\tilde{k} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}_i} \right) + \tilde{\rho} \tilde{T} \left(\tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{c}_p}{\partial \tilde{x}_i} \right) \quad (7)$$

유동물성치

$$\tilde{\rho} = \left(\frac{0.5r_T + 1}{\tilde{T}r_T + 1} \right), \quad \tilde{\mu} = \left(\frac{\tilde{T}r_T + 1}{0.5r_T + 1} \right)^{0.7}$$

$$\tilde{k} = \left(\frac{\tilde{T}r_T + 1}{0.5r_T + 1} \right)^{0.8}, \quad \tilde{c}_p = \left(\frac{\tilde{T}r_T + 1}{0.5r_T + 1} \right)^{0.1} \quad (8)$$

여기서 무차원 속도와 온도는 다음과 같이 정의하였다.

$$\tilde{u} = \frac{u}{w_0}, \quad \tilde{v} = \frac{v}{w_0}, \quad \tilde{w} = \frac{w}{w_0}, \quad \tilde{T} = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (9)$$

유동물성치는 막온도 (T_f)에서의 값을 사용하여 무차원화하였으며, 식 (5)~(7)에 나타난 무차원수와 막온도는 다음과 같다.

$$Pr = \frac{\mu_f c_{p,f}}{k_f}, \quad Re = \frac{\rho_f w_0 H}{\mu_f},$$

$$Gr = \frac{g \rho_f^2 H^3 (T_h - T_c)}{\mu_f^2 T_f}$$

$$r_T = \frac{T_h - T_c}{T_c}, \quad T_f = \frac{T_h + T_c}{2} \quad (10)$$

이 연구에서의 경계조건은 유입 유체는 수력학적으로 완전발달한 등온유동이라고 가정하여 직사각형 관에서의 Poiseuille 유동에 대한 해석적인 속도분포식⁽⁷⁾을 사용하였다. 출구에서는 유동방향으로 대류가 지배적이라는 가정을 통해 운동량과 에너지의 확산을 무시하였다. 채널의 윗면과 susceptor를 제외한 아랫면은 물에 의해 냉각된다는 가정하에 등온($T_c = 300K$)으로 유지되며 susceptor가 있는 고

온부의 온도(T_h)는 1000K, 채널의 옆면은 단열로 가정하였다. 이러한 조건하에 경계조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

입구

$$\begin{aligned} \hat{T} &= 0, \quad \bar{v} = \bar{w} = 0, \\ \bar{u} &= \frac{48}{\pi^3} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^3} (-1)^{(i-1)/2} \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{i\pi H}{W}\left(\bar{y} - \frac{1}{2}\right)\right)}{\cosh\left(i\pi \frac{H}{2W}\right)} \right\} \\ &\quad \times \cos\left(\frac{i\pi H}{W}\left(\bar{x} - \frac{W}{2H}\right)\right) \cdot \left\{ 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{W}{H} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \right. \\ &\quad \left. \tanh\left(i\pi \frac{H}{2W}\right) \right\}^{-1} \end{aligned}$$

출구

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \bar{w}}{\partial \bar{x}} = \frac{\partial \hat{T}}{\partial \bar{x}} = 0 \quad (12)$$

대칭면

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{z}} = \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{z}} = \bar{w} = \frac{\partial \hat{T}}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (13)$$

옆면(단열면)

$$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0, \quad \frac{\partial \hat{T}}{\partial \bar{z}} = 0 \quad (14)$$

윗면

$$\bar{u} = \bar{v} = \bar{w} = 0, \quad \hat{T} = 0 \quad (15)$$

아랫면

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \bar{v} = \bar{w} = 0 \\ \hat{T} &= 0, \quad 0 \leq \bar{x} < 3, \quad 6 < \bar{x} \leq 10 \\ \hat{T} &= 1, \quad 3 \leq \bar{x} \leq 6 \end{aligned} \quad (16)$$

증착공정에 사용되는 가스의 Pr 는 대부분 0.7이 라고 볼 수 있으며, 주어진 온도조건($T_h=1000K$, $T_c=300K$)에서 무차원 온도비 r_r 는 2.333이다. 따라서 이 연구에서 고려한 증착공정에서의 열전달 특성은 무차원수 Re , Gr 와 반응부의 경사각 θ 에 의해 결정되어진다고 할 수 있다. Table 2는 이 연구에서 수행한 변수들의 범위이다.

3. 수치해석방법 및 검증

3.1 수치해석기법

Fig. 1에서 보듯이 계산영역은 직교직각좌표계로 표시할 수 없기 때문에 지배방정식을 다음과 같이 표시되는 일반좌표계로 변환하여 이산화하였다.

$$\xi = f(x, y, z), \quad \eta = f(x, y, z), \quad \zeta = f(x, y, z) \quad (17)$$

식 (1)과 (2)를 일반좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \xi^j} (\rho U_j) = 0 \quad (18)$$

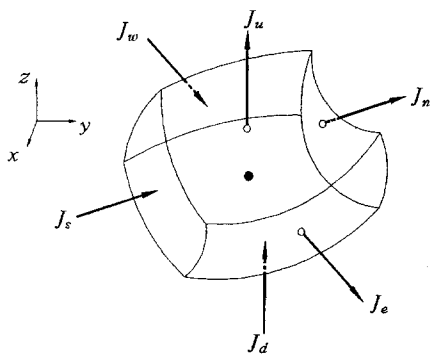
$$\frac{\partial}{\partial \xi^j} \left(\rho U_j \phi - \frac{\Gamma^\phi}{J} D_m^j \frac{\partial \phi}{\partial \xi^m} \right) = JS^\phi \quad (19)$$

여기서, 반변속도성분 U_j 와 기하학적 계수 D_m^j 는 다음과 같이 정의된다.

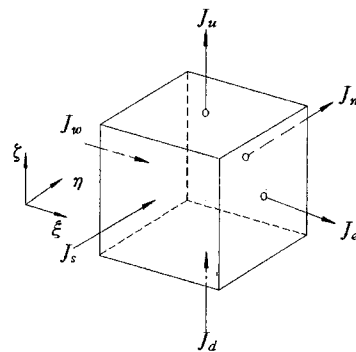
$$U_j = b_k^j u_k \quad (20)$$

Table 2 Parameter ranges for the present work.

Re	10~100
Gr	$5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5$
Dimensionless temperature difference (r_r)	2.333
Angle of tilted susceptor (θ)	$0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$



(a) Physical space



(b) Transformed space

Fig. 3 Control volume representation.

$$D_n^i = b_i b_n^n \quad (21)$$

b_i^n 는 좌표변환 $x^i = x^i(\xi_j)$ 의 자코비안 행렬에서 $\partial x^i / \partial \xi^j$ 의 여인수(cofactor)를 나타내고, J 는 자코비안 행렬식을 의미한다.

일반 곡선 좌표계로 표현한 지배방정식을 유한체적법을 사용하여 Fig. 3에 나타난 검사체적에 대해 적분을 하고 이산화하면 ϕ 에 대한 대수방정식을 얻을 수 있다.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_U \phi_U + a_D \phi_D + b_{NO} + b^o \quad (22)$$

식 (22)를 유도하는 과정에서 대류항은 맥승도식을 사용하였고, 확산항은 2차오더의 중앙차분도식을 사용하였다. 사용한 격자계는 속도성분 및 모든 스칼라량을 검사체적의 중앙에 저장하여 계산하는 비엇갈림격자계를 사용하였고, 운동량방정식의 주종속변수로는 직교좌표좌표계의 속도성분을 사용하였다. 좌표계의 비직교성으로 인한 2차확산항은 이전 반복계산단계에서의 값을 사용하여 생성항으로 처리하여 구하였다. 운동량방정식에 나타나는 압력항은 SIMPLE알고리즘⁽⁸⁾을 사용하여 구하였고, 비엇갈림격자계를 사용함으로써 나타날 수 있는 압력과 속도의 분리는 Rhie 등⁽⁹⁾이 제안한 운동량보간법을 사용하여 해결하였다.

수치해석을 위해 대수적 방법을 사용하여 격자계를 구성하였으며 계산에 사용한 격자는 $45 \times 15 \times 20$, 즉 13500개의 검사체적을 갖는 격자를 사용하였다. 보다 조밀한 $60 \times 20 \times 30$ 격자계를 사용한 경우, 계산시간은 훨씬 많이 걸리는 반면, 반응부에서의 총합 열전달은 5% 미만의 차이를 나타냈기 때문에 이 연구에서는 효율성을 고려해서 모든 계산에 $45 \times 15 \times 20$ 격자계를 사용하였다. 이 연구의 수렴판정의 기준은 수치해석에 의하여 얻어진 해가 아래의 식을 만족할 때로 하였다.

$$\left| \frac{\phi_{\max}^{n+1} - \phi_{\max}^n}{\phi_{\max}^{n+1}} \right| < 10^{-5} \quad (23)$$

여기서 ϕ 는 모든종속변수를 의미하고 상첨자 n 은 반복횟수를 의미한다.

3.2 프로그램 타당성 검증

이 연구에서 CVD 반응기 내부의 열전달 특성을 해석하기 위해 3차원 비직교좌표계와 비엇갈림 격자계를 사용하는 수치해석 프로그램을 개발하였다.

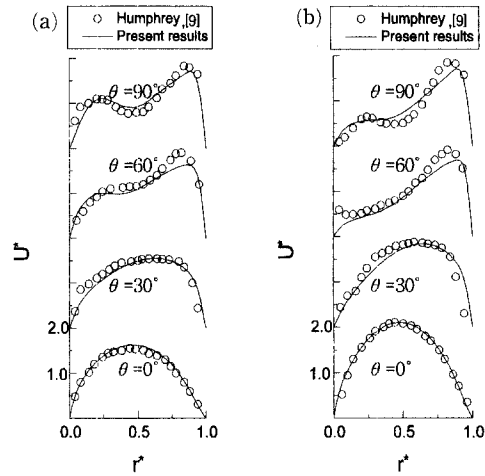


Fig. 4 Streamwise velocity profiles: (a) $Z=0.25$; (b) $Z=0.5$.

이와같이 작성한 프로그램의 타당성 검증을 위하여 Humphrey⁽¹⁰⁾의 90° 곡관내의 층류유동에 관한 연구와 Chiu 등⁽¹¹⁾의 수평평판에서 혼합대류유동의 입구길이에 관한 연구에 대해 각각 적용하였고 결과를 실험값들과 비교, 검토하였다.

3.2.1 90° 곡관내의 층류유동

90° 곡관내부의 유동은 덕트의 곡률에 의한 원심력과 압력구배에 의하여 2차유동과 주유동방향 속도의 변형이 발생한다. 곡관입구에서 수력지름의 3배 길이만큼 직관부분을 두었고 Reynolds수 790의 수력학적으로 완전 발달한 속도분포를 입구조건으로 하였다. 출구쪽에는 수력지름의 5배만큼의 직관부를 두었고 모든 종속변수에 Neumann경계조건을 설정하였다.

Fig. 4에 곡관 단면의 1/2과 1/4지점에서의 주유동방향 속도분포를 Humphrey의 실험결과와 비교하여 나타내었다. 그림에서 보면 θ 가 증가할수록 원심력의 영향으로 곡관내 최대속도의 위치가 외벽 방향으로 이동함을 알 수 있다. θ 가 60° 와 90° 일 때 약간의 오차를 보이고 있지만 수치해석결과와 실험치간에 정성적 및 정량적으로 잘 일치하고 있다고 할 수 있고 따라서 이 연구에서 작성한 일반 좌표계에서의 수치해석 프로그램의 타당성을 확인할 수 있다.

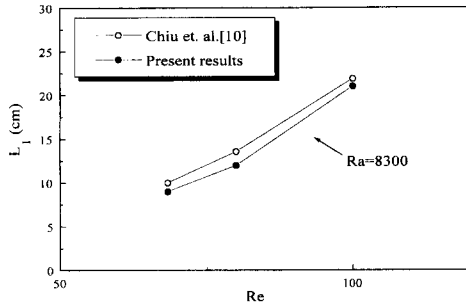


Fig. 5 Comparison of present work and Ref. (11) for the entrance length L_1 .

3.2.2 수평평판에서 혼합대류유동의 입구길이

Chiu 등⁽¹¹⁾은 CVD 운전조건과 유사하게 밀면의 온도가 T_c 에서 갑자기 T_h 로 변하는 수평채널에서 부력에 의한 2차유동이 유발하는 입구길이에 관하여 실험적으로 연구하였다. 이 연구에서는 Chiu의 실험장치와 동일한 $H=1.58\text{cm}$ 의 높이를 갖는 2차원 채널을 대상으로 Rayleigh수가 8300인 경우에 대하여 Reynolds수를 68.3, 80, 100으로 변화시켜 가면서 수치계산을 하였고 그 결과를 실험값과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 입구길이 L_1 은 참고 문헌 (11)의 정의에 의하여 밀면으로부터 $0.2H$ 떨어진 부근의 속도와 입구속도와의 상대오차가 3% 이상 되는 지점으로 정하였다. 그림에서 보듯이 이 연구에서 수행한 수치해석 결과와 실험값은 정성적으로 잘 일치하고 있다. 실험값과의 오차는 최대로 11%정도이나, 이것은 참고문헌 (11)에 의하면 실험오차 범위내에 있다고 볼 수 있다.

4. 결과 및 고찰

이 연구에서는 기울어진 가열부를 갖는 3차원 채널내의 층류 혼합대류 열전달의 유동 및 열전달 특성을 수치적으로 규명하였다. 또한, 채널 높이와 입구 유속을 나타내는 무차원 매개변수인 Grashof 수와 Reynolds수를 변화시켜가면서 이들이 유동 및 열전달에 미치는 영향을 예측하였고, 가열부의 경사각도 θ 의 변화에 따른 열유속분포의 변화를 검토하였다. 이 연구에서 계산에 사용된 Gr 와 Re 의 범위는 일반적인 CVD반응기의 운전조건에 해당하는, Re 는 10~100사이를 Gr 는 10^6 미만을 고려하였다. 이 범위에서 유동특성은 강제대류가 지배적인 경우부터 자연대류 효과가 중요한 경우까지

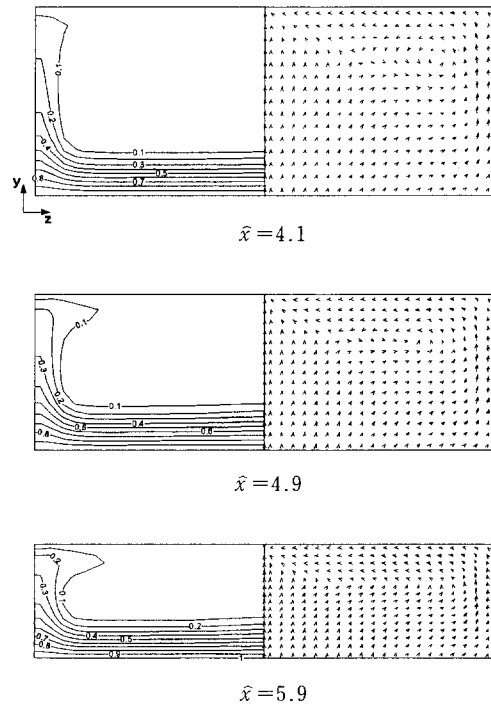


Fig. 6 Temperature and velocity fields in a transverse cross-sectional plane at $Gr=10^5$, $Re=100$.

를 포함한다.

4.1 채널내의 속도 및 온도분포

부력의 강도를 나타내는 변수 Gr/Re^2 의 변화가 열 및 유동장에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 경사각($\theta=10^\circ$)과 $Gr(=10^5)$ 을 고정시킨 상태에서 Re 가 100과 25인 경우의 온도 및 속도 분포를 여러 가지 \hat{x} 및 \hat{z} 의 위치 변화에 대하여 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였다.

Fig. 6은 기본형상($\theta=10^\circ$)에 대해서 $Re=100$, $Gr=1 \times 10^5$ 인 경우에, $y-z$ 단면에 대한 속도 및 온도분포를 도시한 것이다. 이 경우 $Gr/Re^2=10$ 으로써 부력에 의한 자연대류 효과가 적을 것으로 예측할 수 있다. 그림을 보면 예측한대로 유동단면에서 2차유동이 매우 적게 나타나고 있고, 주로 단열 벽면쪽에서만 존재함을 알 수 있다. 이는 중방향 회전이 미약해 채널 옆면에서의 2차유동이 중심으로 전파되지 못해 채널의 중심에서의 온도장은 강제대류의 경우와 거의 유사하다. 그러나 Re 가 25인 경우의 Fig. 7을 보면 $Gr/Re^2=160$ 이므로 그림

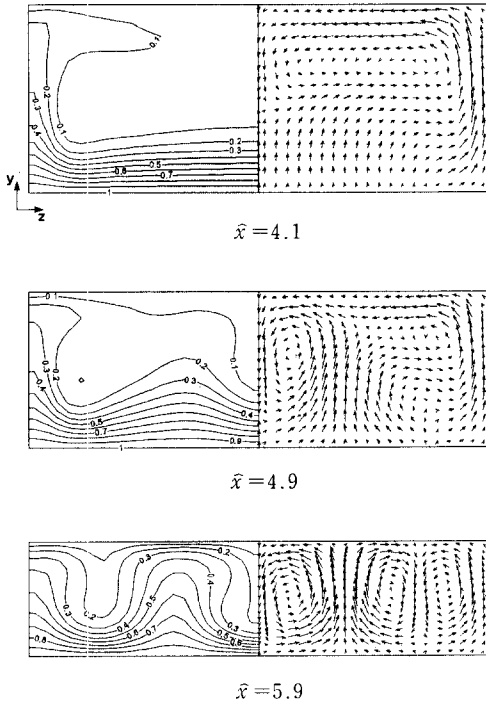


Fig. 7 Temperature and velocity fields in a transverse cross-sectional plane at $Gr=10^5$, $Re=25$.

에서 보듯이 채널 단면에서 부력에 의한 2차유동이 크게 나타나고 있다. 즉, 급격한 온도변화가 일어나는 반응부 초기에는 밀면과 열면, 그리고 채널 중심부에서 위로 향하는 2차유동이 크게 형성되고 이로 인하여 단면의 아랫부분에 유량손실을 보전하기 위하여 주유동방향(x -방향)으로의 속도가 증가하게 된다. 유동이 x -방향으로 진행함에 따라 유동단면은 좁아지게 되고 2차유동은 더욱 활발해지며 종방향으로의 회전이 확연히 나타나게 된다. 이것은 반응부 후반까지 유지되며 단면에서의 속도분포는 밀폐공간에서의 Bernard cells와 흡사하게 형성된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 Re 가 100과 25일때의 x - y 단면에서의 속도 및 온도분포이다. Re 가 100인 경우 Fig. 8에서 보듯이 부력에 의한 자연대류 효과가 적기 때문에 속도 및 온도분포는 강제대류와 거의 같음을 알 수 있다. 다만 채널 옆면 부근은 단열벽의 효과로 인해 약간의 2차유동이 발생하고 이에따라 온도가 뒷쪽으로 전파되었음을 볼 수 있다. 채널 중심에서의 등온선은 반응부에서의 열

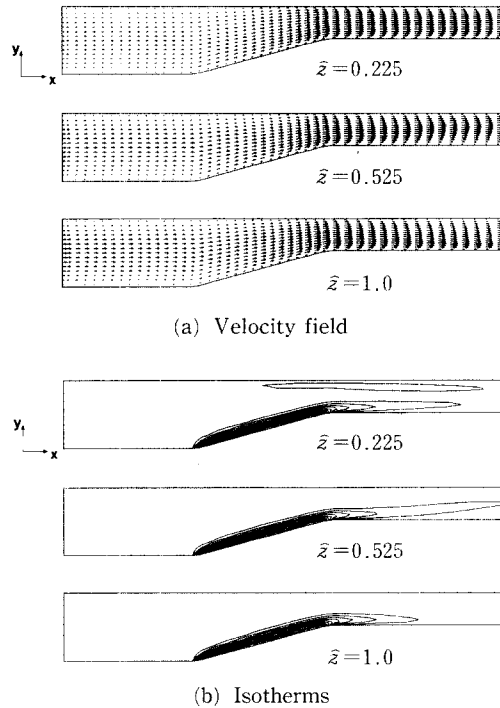


Fig. 8 Velocity and temperature fields in a longitudinal plane at $Gr=10^5$, $Re=100$.

경계층을 나타내며 부력의 효과가 적기 때문에 얇은 경계층을 형성하고 있다. 또한 반응부가 10° 로 기울어져 있으므로 유동이 하류로 갈수록 열경계층이 확장되는 것을 막게되어 가열부 전반부나 후반부가 거의 같은 열경계층을 형성하고 있다. 채널의 출구부분에서는 유체는 모든 벽으로 열을 잃어버리므로 온도와 밀도는 점차 일정해지게되며 2차유동이 사라져 속도는 완전발달해 가게 된다.

Fig. 9에 나타난 Re 가 25인 경우의 x - y 단면에서의 속도분포를 검토해보면 유동방향으로 횡방향 회전에 의한 역류가 존재하는 것을 분명히 알 수 있다. 횡방향 회전은 고온부 전반에서 형성되며 채널 중심부에서 가장 크고 열면으로 갈수록 작아진다. 역류의 존재는 채널을 관통하는 유체의 면적을 감소시키기 때문에 단면을 통한 축방향 속도를 증가시킨다. 이것은 앞에서 Fig. 7에서 검토한 결과와 같으며 그림에서 보듯이 반응부 근처의 속도가 상대적으로 크게 형성되고 있음을 알 수 있다. 온도의 경우 z -방향을 따라 서로 다르게 형성된다. 이것은 유동단면에서의 2차유동이 상승과 하강을 반복하고 있기 때문이다. Re 가 100인 때보다 강한

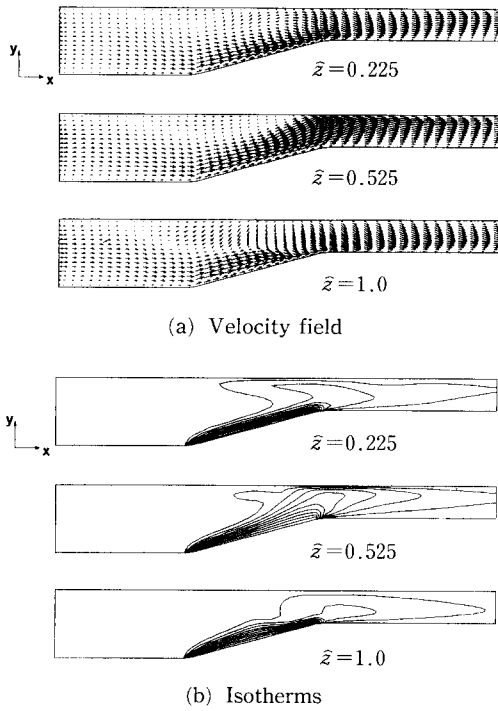


Fig. 9 Velocity and temperature fields in a longitudinal plane at $Gr=10^5$, $Re=25$.

부력의 영향으로 가열부에서의 온도가 윗면으로 많이 전파되고 있으며, 또한 역류의 영향으로 등온선의 왜곡현상이 발생하고 있다. 강한 2차유동은 온도의 확산을 증대시키고 결과적으로 가열부 후반으로 갈수록 열경계층의 확대를 유발하게 된다.

4.2 가열부에서의 열유속 분포

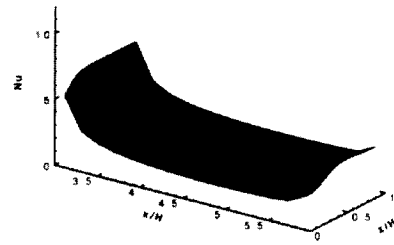
CVD반응기에서 막의 증착률과 균일성을 향상시키기 위해서는 susceptor에서의 열전달이 증가하여야 하고 또한 균일하게 분포하여야 한다. 이 연구에서는 다음과 같이 정의되는 Nusselt수를 이용하여 susceptor에서의 열전달량을 계산하였다.

$$Nu = \frac{q \cdot H}{k(T_h - T_c)} \quad (24)$$

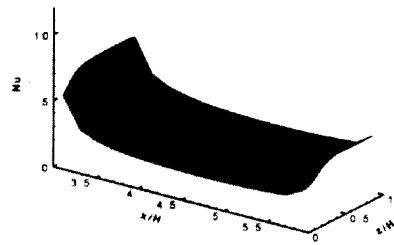
$$\bar{Nu} = \frac{1}{\int dA} \int NudA \quad (25)$$

여기서 q 는 다음과 같이 정의되는 국소열전달이다.

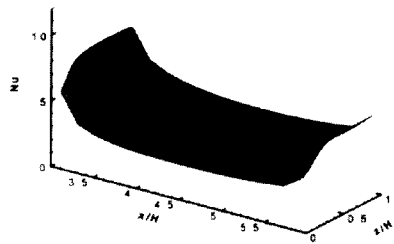
$$q = -\left(k \frac{\partial T}{\partial n}\right)_{wall} \quad (26)$$



(a) $Re=25$; $Nu_{max}=6.727$, $Nu_{min}=1.556$



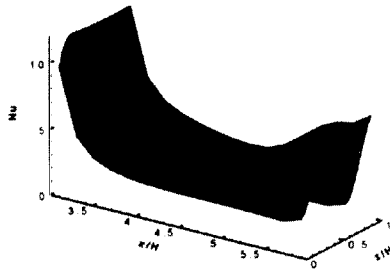
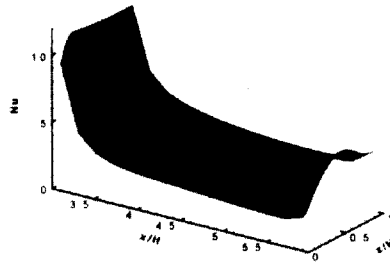
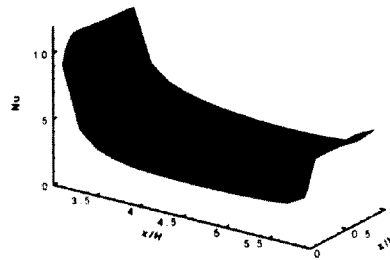
(b) $Re=50$; $Nu_{max}=7.205$, $Nu_{min}=2.040$



(c) $Re=100$; $Nu_{max}=8.048$, $Nu_{min}=2.583$

Fig. 10 Surface maps of the local Nusselt numbers for $Gr=10^4$.

Gr 가 1×10^4 인 경우 Re 의 변화에 따른 고온부에서의 국소 Nu 를 Fig. 10에 도시하였다. 이 그림에서 Nu_{max} 와 Nu_{min} 은 국소 Nu 의 최대 값과 최소 값이다. 예상대로 큰 열유속값은 고온부의 시작점 근처에서 나타난다. 고온영역을 지나면서 Nu 는 유동방향으로 점차 감소하다가 저온의 출구영역을 만나면서 약간 상승한다. Re 의 증가에 따른 Nu 의 증가는 예리한 온도구배, 또는 높은 Re 에서의 얇은 열경계층을 반영한다. 그림에서와 같이 Gr 가 1×10^4 의 경우 주어진 Re 에서 속도장을 검토해보면 역류는 존재하지 않았고 2차유동도 매우 미약하기 때문에 Nu 의 분포는 거의 강제대류에서의 결과와

(a) $Re=25$; $Nu_{max}=11.884$, $Nu_{min}=1.802$ (b) $Re=50$; $Nu_{max}=11.365$, $Nu_{min}=2.001$ (c) $Re=100$; $Nu_{max}=11.197$, $Nu_{min}=2.589$ **Fig. 11** Surface maps of the local Nusselt numbers for $Gr=10^5$.

유사하다. 열유속분포의 비균일성은 열경계층의 발달과 단열 옆면 벽의 존재에 기인한다.

Fig. 11은 Gr 가 1×10^5 인 경우 각각의 Re (25, 50, 100)의 변화에 따른 고온부의 국소 Nu 이다. 그림에서 보는 바와 같이 열유속분포의 비균일성은 Gr 가 커질수록 심화된다. Re 가 25, 50일 때에는 유동방향으로 역류가 존재했고 2차유동의 세기도 강했다. Gr/Re^2 의 비가 큰 유동에서는 횡방향 회전의 발달이 열유속분포의 비균일성을 증가시킨다. $Re=25$, $Gr=1 \times 10^5$ 일 때의 경우인 Fig. 11(a)는

Table 3 Average Nusselt number for the various tilted angles(θ).

	$\frac{Gr}{Re^2}$	\overline{Nu}			
		$\theta=0^\circ$	$\theta=5^\circ$	$\theta=10^\circ$	
$Gr=10^4$	$Re=100$	1	3.313	3.816	4.482
	$Re=50$	4	2.817	3.153	3.556
	$Re=25$	16	2.565	2.736	2.969
$Gr=10^5$	$Re=100$	10	4.296	4.769	5.318
	$Re=50$	40	4.144	4.352	4.675
	$Re=25$	160	4.468	4.581	4.591

z -방향으로의 비균일성이 매우 크게 나타남을 보여 주고 있다.

이것은 앞에서 언급했듯이 채널단면에서의 유동 패턴이 종방향 회전과 횡방향 회전의 상호작용으로 매우 복잡하게 형성된 데에서 기인한다. 같은 Re 에서 Gr 가 다른 Fig. 10과 Fig. 11을 비교해보면 부력의 영향이 크기 때문에 횡방향 회전이 존재하는 Fig. 11에서 고온부 초기점에서의 Nu 가 더 클 수 있다. 이것은 횡방향 회전에 의한 역류가 유동단면을 감소시켜 이 부근에서의 열전달을 증대시키기 때문이다. 그러나, 회전의 상호작용으로 인한 강한 2차유동은 고온부 후반으로 갈수록 z -방향의 비균일성을 심화시키게 된다. Re 가 50일 때는 고온부 시작점에서는 Gr 의 증가에 따라 열전달이 향상되고 균일성도 좋지만 x 가 증가함에 따라 z -방향으로의 비균일성이 증가한다. 역류가 존재하지 않는 $Re=100$ 의 경우는 Gr 의 증가로 인하여 열전달이 향상되었고, 열유속분포는 거의 변화 없이 균일하게 유지되었다. 같은 Gr 에서 Re 가 줄어들수록 열유속분포가 균일하지 않은 것은 종방향 회전의 강도가 증가하면서 2차유동이 커지기 때문이라고 할 수 있다.

4.3 경사각의 변화에 따른 열유속 분포

수평CVD 반응기에서 susceptor는 일반적으로 경사지게 놓이는데 이것은 열경계층의 성장을 지연시켜 후반부에서의 열전달 감소를 막기 위한 것이다. 이 연구에서는 경사각 θ 가 각각 0° , 5° , 10° 일 때 Re 와 Gr 를 변화시켜가면서 반응부에서의 열전달특성을 검토하였다. Table 3에 각각의 변수들에

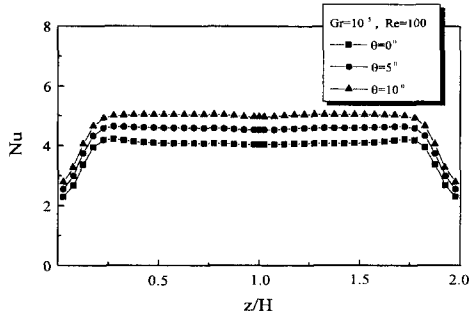
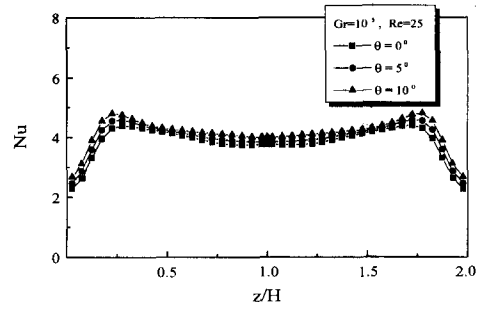
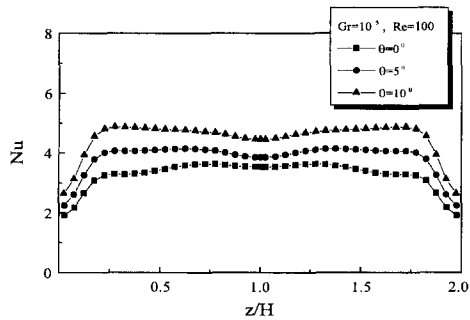
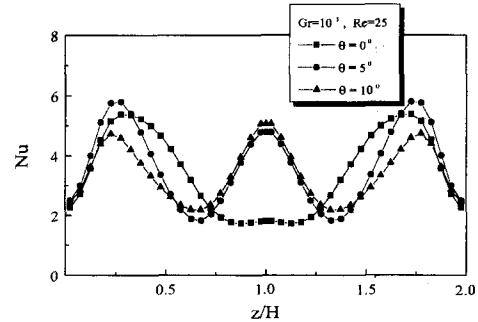
(a) $\bar{x}=3.9$ (a) $\bar{x}=3.9$ (b) $\bar{x}=5.1$ (b) $\bar{x}=5.1$

Fig. 12 Local Nusselt numbers on the hot surface of the channel for $Gr=1 \times 10^5$, $Re=100$; (a) for a transverse cross-sectional (yz) plane: $\bar{x}=3.9$, (b) $\bar{x}=5.1$.

Fig. 13 Local Nusselt numbers on the hot surface of the channel for $Gr=1 \times 10^5$, $Re=25$; (a) for a transverse cross-sectional (yz) plane: $\bar{x}=3.9$, (b) $\bar{x}=5.1$.

대하여 반응부에서의 평균 Nu 를 나타내었다. 표에서 보듯이 반응부를 기울일수록 전반적으로 열전달이 향상됨을 알 수 있다. 이것은 유동단면의 감소로 인한 유속 증가로 경계층의 성장을 지연시킴으로써 반응부 후반에서의 열전달 증가에 기인한 것이라고 할 수 있다. 그러나 Re 가 작을수록 반응부를 기울인 효과가 나타나지 않는데, 이는 부력에 의한 2차유동이 활발해지기 때문에 유속증가로 인한 열경계층의 성장을 지연시키는 효과를 기대할 수 없기 때문이다.

경사각의 변화가 열유속분포의 균일성에 미치는 영향을 알아보기 위해 강제대류가 지배적인 경우 ($Gr=1 \times 10^5$, $Re=100$)에 대하여 반응부 전반($\bar{x}=3.9$)과 후반($\bar{x}=5.1$)의 yz 단면에서의 Nu 를 Fig. 12에 도시하였다. 그림에서 보듯이 자연대류의 영향이 미미하기 때문에 양열의 단열벽면 부근을 제외하고는 전체적으로 균일한 열유속분포를 형성하고 있다. 특히 $\theta=10^\circ$ 인 경우 반응부 초반

(Fig. 12(a))과 후반(Fig. 12(b))에서의 Nu 가 거의 같은 값을 나타내고 있다. 이것은 반응부의 경사각 θ 를 10° 만큼 기울임으로써 주유동방향을 따라서 고른 열유속분포를 얻을 수 있음을 보이는 것이다.

Fig. 13은 자연대류의 영향이 우세한 경우($Gr=1 \times 10^5$, $Re=25$)에 yz 단면에서 Nu 분포를 나타낸 것이다. 반응부 초반에는 비교적 고른 열유속분포를 보이고 있으며 θ 의 증가에 따른 열전달의 향상이 나타나고 있다. 그러나 후반부에서는 심한 불균일성을 나타내고 있으며, θ 가 증가하여도 열유속분포의 균일성은 향상되지 않고 있다. 이것은 기울어진 반응부로 인한 유속증대의 효과보다는 부력에 의한 2차유동의 영향이 더욱 크기 때문이라고 할 수 있다. 강한 부력의 영향($Gr/Re^2=160$)은 채널내부에 횡방향 회전으로 인한 역류를 형성하고, 종방향 회전과의 상호작용으로 유동이 불안정하게 되어 반응부에서의 열경계층 두께가 서로 다르게 형성되기 때문이다. 따라서 채널내부에 역류가 존재

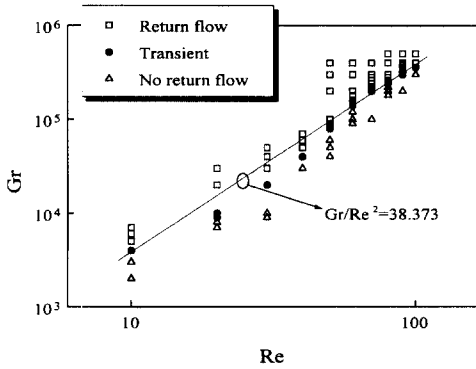


Fig. 14 The dependence of the occurrence of return flows on Gr and Re .

하는 큰 Gr/Re^2 값을 갖는 유동조건에서는 반응부의 경사각 θ 의 증가가 전체적으로 열전달은 향상되지만, 열유속분포의 균일성에 미치는 영향은 별로 없다고 할 수 있다.

4.4 역류가 발생하는 임계조건

앞에서 검토한 바와 같이 고온부에서 열유속분포의 균일성을 향상시키기 위해서는 채널내에 역류가 존재하지 않는 것이 좋다. 이 연구에서는 susceptor의 경사각이 10° 인 경우에 대하여 Gr 와 Re 를 다양하게 변화시켜가면서 부력의 강도를 나타내는 무차원수의 비인 Gr/Re^2 의 값에 따른 역류의 발생유무를 계산하였다. 역류의 존재여부를 정의하는 것은 다소 주관적이지만 이 연구에서는 Visser 등⁽⁶⁾의 정의에 따라 먼저 주유동방향(x-방향)의 속도가 $-0.1 \times U_{ave}$ 보다 작은 속도가 존재할 경우에 역류가 발생하는 것으로 정의하였다. 여기서 U_{ave} 는 평균 입구유속이다. 역류가 발생하지 않는 경우는 모든 계산영역에서 포물선 속도분포가 유지되는 것으로 설정하였고, 그 외의 모든 경우는 천이영역으로 구분하였다. 계산에 사용한 무차원수의 범위는 Re 는 10에서 100, Gr 는 1×10^3 에서 1×10^6 까지로 선택하였다. Fig. 14에 Re 와 Gr 의 변화에 따른 유동특성을 도시하였다. 그림에서 보듯이 Re 가 작은 유동에서는 비교적 작은 Gr 에서도 역류가 발생하지만 Re 가 증가함에 따라 역류가 발생하는 Gr 도 증가하게 된다. 이것은 Gr/Re^2 의 비가 어떤 임계값 이상이 될 경우에 역류가 발생한다는 것을 의미한다. Fig. 14에서 천이 영역에 대하여 최소자승법으로 접합곡선을 구하면 Gr/Re^2 의 비는

38.373의 값을 갖는다. $Gr/Re^2 > a_{cr}$ 인 경우에 역류가 발생한다고 하면 임계값 a_{cr} 의 범위는 대략 25에서 45까지이다.

5. 결 론

이 연구에서는 다양한 형상에 적용할 수 있는 곡선좌표계에서의 수치해석 프로그램을 개발하여 그 타당성을 검토하였고, 이를 3차원 CVD반응기에 적용하여 고온의 반응부에서의 혼합대류 열전달 특성을 수치적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 채널높이에서 Reynolds수의 증가는 유입속도를 증가시켜 열경계층의 두께를 얇게 하여 반응영역에서의 열전달을 전반적으로 향상시켰다. 그러나 일정한 유입속도에서 채널높이가 증가하면 자연대류의 효과가 지배적으로 나타나 국소적으로 열전달이 향상되지만 열유속분포의 비균일성이 심화되었다.

(2) 기울어진 susceptor의 적용은 유로단면이 점차 좁아지게 되어 부력에 의한 2차유동의 효과를 억제하면서 주유동방향 속도의 증가를 가져오게 되어 전체적인 열전달을 증대시켰으며 주유동방향으로의 열유속분포의 균일성을 향상시켰다. 그러나 채널내에 역류가 존재하는 경우에는 회전들의 상호작용으로 유동이 불안정해지며 이에 따른 강한 2차유동으로 인하여 채널단면에서의 열유속분포 균일성에 미치는 영향은 거의 없었다.

(3) Gr/Re^2 의 비가 임계값(35 ± 10) 이상인 경우에 발생하는 횡방향 회전은 부분적으로 높은 열전달률을 유발하지만 반응부의 열유속분포의 균일성에는 좋지 않은 영향을 미침을 알 수 있었다. 반응부에서의 열전달 향상과, 열전달률 분포의 균일성 증대를 위해서는 입구유속과 채널의 높이, 채널내의 온도차에 대한 최적화가 필요하며, 설계범위내에서 입구유속을 크게 해서 Gr/Re^2 의 임계값 이하로 하는 것이 좋다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구비(961-0100-001-2)의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Houtman, C., Graves, D. B. and Jensen, K. F., 1986, "CVD in Stagnation Point Flow," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 133(5), pp. 961~970.
- (2) van de Ven, J., Rutten, G. M. J., Raaijmakers, M. J. and Giling, L. J., 1986, "Gas Phase Depletion and Flow Dynamics in Horizontal MOCVD reactors," *J. Crystal Growth*, Vol. 76, pp. 352~372.
- (3) Karki, K. C., Sathyamurthy, P. S. and Patankar, S. V., 1994, "Laminar Mixed Convection in a Horizontal Semicircular Duct with Axially Nonuniform Thermal Boundary Condition on the Flat Wall," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 25, pp. 171~189.
- (4) Evans, G. and Greif, R., 1993, "Thermally Unstable Convection with Applications to Chemical Vapor Deposition Channel Reactors," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 11, pp. 2769~2781.
- (5) Ouazzani, J. and Rosenberger, F., 1990, "Three-Dimensional Modelling of Horizontal Chemical Vapor Deposition," *J. Crystal Growth*, Vol. 100, pp. 545~576.
- (6) Visser, E. P., Kleijn, C. R., Govers, C. A. M., Hoogendoorn, C. J. and Giling, L. J., 1989, "Return Flows in Horizontal MOCVD Reactors Studied with the Use of TiO₂ Particle Injection and Numerical Calculations," *J. Crystal Growth*, Vol. 94, pp. 929~946.
- (7) White, F. M., 1974, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.
- (8) Partankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York.
- (9) Rhie, C. M. and Chow, W. L., 1983, "Numerical Study of the Turbulent Flow Past an Airfoil with Trailing Edge Separation," *AIAA J.*, Vol. 11, pp. 1525~1532.
- (10) Humphrey, J. A. C., Taylor, A. M. K. and Whitelaw, J. H., 1977, "Laminar Flow in a Square Duct of Strong Curvature," *J. Fluid Mechanics*, Vol. 83, pp. 509~527.
- (11) Chiu, K. C. and Rosenberger, F., 1987, "Mixed Convection Between Horizontal Plates-I. Entrance Effects," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1645~1654.