

〈論 文〉

환상형원관을 사용하는 수정된 화학증착(MCVD)방법에서 내부 제트분사가 입자부착에 미치는 영향

최만수* · 박경순**

(1993년 8월 28일 접수)

Effects of Inner Jet Injection on Particle Deposition in the Annular Modified Chemical Vapor Deposition Process Using Concentric Tubes

Mansoo Choi and Kyoung Soon Park

Key Words : Chemical Vapor Deposition(화학증착), Optical Fibers(광섬유), Thermal Processing(열가공공정)

Abstract

In the annular Modified Chemical Vapor Deposition process using two concentric tubes, the inner tube is heated to maintain high temperature gradients to have high thermophoretic force which can increase particle deposition efficiency. However, higher axial velocity in a narrow gap between inner and outer tubes can result in a longer tapered entry length. In the present paper, a new concept using an annular jet from the inner tube is presented and shown to significantly reduce the tapered entry length with maintaining high efficiency. Effects of a jet injection on heat transfer, fluid flow and particle deposition have been studied. Of particular interests are the effects of jet velocity, jet location and temperature on the deposition efficiency and tapered length. Torch heating effects from both the previous and present passes are included and the effect of surface radiation between inner and outer tubes is also considered.

기 호 설 명

C_p, C_{solid} : 유체와 원관의 정압비열	P : 압력
C_1 : 프랑크의 스펙트럴 에너지분포 상수 ($0.5955219 \times 10^{-16} W \cdot m^2 / sr$)	r : 반경방향좌표
C_2 : 프랑크의 스펙트럴 에너지분포 상수 ($0.01438769 m \cdot K$)	R_1 : 내부원관의 외경
E : 증착효율	R_{2i} : 외부원관의 내경
h : 대류 열전달계수	R_{2o} : 외부원관의 외경
$k_{conduction}, k_{solid}$: 유체와 원관의 열전도도	t : 시간
K : Thermophoretic coefficient	t_s : 원관벽의 두께
n : 굴절률	T : 온도
	T_{rxn} : 화학반응온도
	q_{wall} : 원관표면에서의 열유속
	q_{max} : 최대 열유속
	T_{inner} : 내부원관의 온도
	T_{in} : 유입유체의 온도

*정회원, 서울대학교 기계공학과

**서울대학교 기계공학과 대학원

- u : 축방향속도
 U_{in} : 유입유체의 속도
 $V_{injection}$: 제트분사속도
 v : 반경방향속도
 V_{torch} : 토치이송속도
 x : 축방향 정지좌표

그리스문자

- α : Rosseland mean absorption coefficient
 λ : 열유속 분포계수
 μ : 점성계수
 ν : 동점성계수
 ξ : 축방향 이동좌표
 $\xi_{injection}$: 제트분사 위치
 ξ_{torch} : 토치위치
 ρ, ρ_{solid} : 유체와 원관의 밀도
 δ, γ : 보기계수에 사용되는 각도
 θ_1, θ_2 : 표면의 법선으로부서의 각도

1. 서 론

Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD) 방법^(1,2)은 현재 널리 사용되는 광섬유 제조공정이며 이 방법을 설명하면 다음과 같다. 먼저 깨끗하게 세척된 실리카원관을 선반위에 설치한 다음 원관입구로 SiCl_4 , O_2 , GeCl_4 등의 반응기체를 유입시킨다. 원관을 60~120 rpm으로 회전시키며 원관의 외부를 축방향으로 느리게(보통 10~30 cm/min) 이동하는 수소-산소토치로 가열한다. 반응기체는 가열되어 토치근처에 이르러 화학반응온도에 도달하여 화학반응을 일으키며 그 결과로 SiO_2 나 GeO_2 와 같은 미세한 입자가 생성된다. 생성된 입자는 기체와 함께 이동되다가 원관의 내벽에 부착하게 되며 부착된 입자는 이송되는 토치의 가열에 의해 소결되어 기포가 존재하지 않는 투명한 상태의 유리막을 형성한다. 토치가 원관의 끝부분에 도달하게 되면 다시 토치이동 시작점으로 돌아와 상기의 과정을 반복한다. 즉, 토치가 한번 원관전체를 이송할 때 한층의 유리막을 만들며, 이와 같은 과정을 수십번 반복하여 수십층의 유리막을 만든다. 각 층의 유리막을 만들 때 반응기체의 성분을 조절함으로써 굴절률(refractive index)의 변화를 얻는다. 원하는 증착두께를 얻은 후 반응기체의 유입을 중

지하고 토치가열을 이용하여 원관을 수축(collapsing)하여 원봉모양의 광섬유 모재를 만든다. 모재를 노에서 가열시키면서 가늘게 뽑아 코팅처리를 하여 직경 125 μm 정도의 광섬유를 제조하게 되는 것이다.

MCVD과정에서 입자의 부착은 온도구배가 있는 기체중에 입자가 존재할 때 그 입자가 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 힘을 받아 움직이는 열영동(thermophoresis)으로 알려져 있다.⁽³⁾ Walker 등⁽⁴⁾은 열영동으로 인한 입자의 이동 및 부착에 대하여 실험적, 수치적 연구를 수행하였다. 증착률을 높이기 위한 방안으로서 Laser-Enhanced MCVD방법을 Wang 등⁽⁵⁾과, Morse 등⁽⁶⁾이 제안하여 그 실용성을 검토하였다. Kim과 Pratsinis⁽⁷⁾은 화학반응과 실리카 에어로졸의 거동에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 환상형원관을 사용한 MCVD방법에 대하여 Fiebig 등⁽⁸⁾은 수치해석적인 연구로써 증착률을 높일 수 있음을 보였다. 원관의 회전과 부력항을 고려한 3차원 연구는 Choi 등⁽⁹⁾과 Lin 등^(10,11)에 의해 이루어졌다. 박경순⁽¹²⁾은 반복적인 토치이송효과와 원관 벽두께의 영향을 고려하는 두개의 토치를 사용하는 모델을 제안하였으며 벽면온도 및 증착효율을 기존의 실험치와 비교하였으며 잘 일치함을 보였다.

Fiebig 등⁽⁸⁾이 제안한 환상형원관을 사용한 MCVD는 회전하는 silica 원관의 중심에 직경이 작은 원관을 주입하고 이 내부원관을 고온으로 유지시켜서 반경방향의 온도구배를 극대화하는 방법이다. 온도구배가 커지면 온도구배에 의한 열영동이 입자에 가하는 힘이 커져 증착효율과 증착률을 높일 수 있다. 여기에서 증착효율은 주입된 화학물질에 대한 부착된 입자의 비율이며 증착률은 단위시간당 증착된 입자의 질량을 의미한다. 그러나 내부원관의 주입으로 인하여 반응기체가 통과하는 단면적이 감소되며 따라서 유량이 일정할 경우 내부유동의 최고속도가 커져서 형성된 입자가 토치의 전방근처에 부착되지 못하고 축방향으로 멀리 이동된 다음에 부착될 수 있다. 내부원관의 직경을 크게하여 외부원관과 내부원관사이의 간격을 작게하면 온도구배가 더욱 커져서 생성된 입자를 토치 전방근처에 증착시킬 수 있으나⁽⁸⁾ 내·외부 원관사이의 복사 열전달의 영향이 중요하게 되며 따라서 외부원관의 벽면온도가 증가되어 원하였던 온도 구배를 얻을 수 없게 된다. 또한 반응기체가 통과하여야 할 간

격이 작아지므로 유동으로 인한 전단력이 커져서 부착된 입자에 영향을 줄 수 있을 것이라고 생각된다. 부착입자층의 두께는 토치의 초기 이동시작점 전방부터 증가하여 축방향으로 어느 지점에 도달하게 되면 일정한 두께를 유지하게 되는데 두께가 영으로부터 일정두께까지의 축방향의 불균일 부착길이를 경사부착구간(tapered entry)이라 부른다. 경사부착구간은 인발과정중에 제거되므로 줄이는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 환상형원관을 사용한 MCVD공정에서 내부원관으로부터 반경방향으로 제트를 분사하여 경사부착구간을 줄이는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

환상형 MCV방법에서 내부원관으로부터 반경방향으로 제트를 분사하면 입자가 반경방향의 속도성분을 얻게되어 내부분사가 없는 경우보다 먼저 외부원관의 벽근처에 도달하게 될 것이며 보다 짧은 경사부착구간이 형성될 수 있다. 본 연구의 목적은 내부원관으로부터의 분사가 입자의 증착효율 및 축방향 불균일 부착길이에 미치는 영향을 파악하는데 있다. 내부분사가 있는 경우 반응기체의 유동장 및 온도장이 함께 변화하므로 유동 및 열전달해석을 수치적으로 수행하였으며 열영동에 의한 입자이동을 계산하였다. 분사속도, 분사위치, 내부원관의 온도 등이 입자부착성능에 미치는 영향을 파악하는 것이 본 논문의 주된 관심거리이다. 반복이송되는 토치의 영향을 고려하기 위해 두개의 토치를 이용한 모델을 사용하였다.⁽¹²⁾ 온도에 따라 변화하는 물성치의 영향을 포함하였고 내·외부원관사이의 표면복사 영향을 고려하였다. 원관의외부에서는

이전의 연구에서 사용되었던 온도 경계조건 대신 토치의 국소 가열상태를 나타내는 열유속 경계조건을 사용하였다.

2. 해 석

Lin 등^(10,11)의 결과는 MCVD에서 원관의 회전과 부력에 의한 3차원 효과는 원주방향의 입자부착에 영향을 미치나 축방향의 입자이동에 대해서는 큰 영향을 미치지 않음을 보여주고 있다. 또한 원관의 정상적인 회전속도(60~120 rpm)하에서는 원주방향으로 온도분포 및 입자부착이 균일한 분포를 나타내므로 원주방향의 변화량은 무시할 수 있다. 따라서 정상적인 회전속도의 경우를 다루는 본 연구에서는 원주방향의 변화를 무시한 축대칭유동을 가정하여 수치해석을 수행하였다.

생성되는 입자의 양이 기체의 양에 비해 적고 산소 이외의 반응기체는 산소에 비해 상대적으로 적은 양이 사용되기 때문에 반응기체는 이상기체 상태방정식을 만족하는 산소로 이루어졌다고 가정하였다. 이동하는 토치에 좌표계의 중심을 둔 이동 좌표계에서 온도장과 유동장을 준정상상태(quasi-steady state)로 가정하였다.

Fig. 1에서 R_1 은 내부원관의 반경을 표시하 R_{2i} 은 외부원관의 내부표면까지의 반경, R_{2o} 는 외부원관의 외부표면까지의 반경이다. (즉, $t_s=R_{2o}-R_{2i}$ 는 원관의 고체구간의 두께이다.) Fig. 1의 1과 2는 해석이 고려된 구간을 표시하며 1은 기체구간이며 2는 고체구간이다. 토치와 함께 움직이는

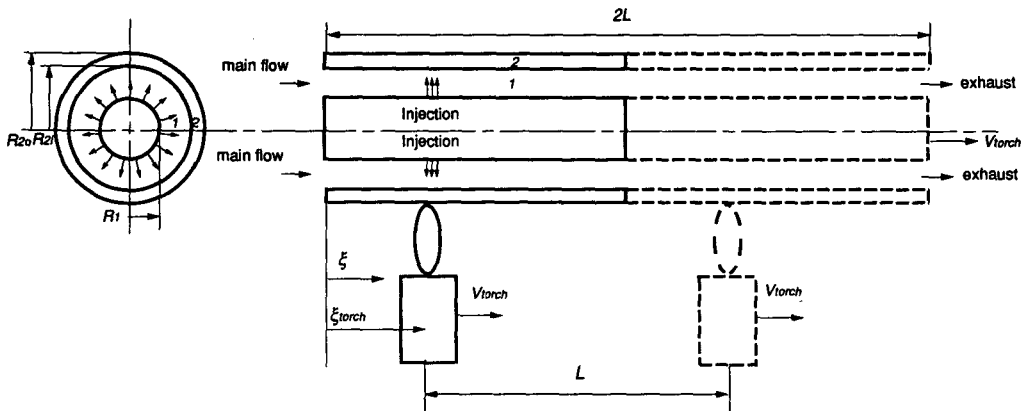


Fig. 1 Sketch of the system

좌표 ξ 를 $\xi = x - V_{torch}t$ 로 정의하고 원통좌표계를 사용하면 지배방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

2.1 기체구간의 지배방정식

• 연속방정식

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \xi} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v)}{\partial r} = 0 \quad (1)$$

• 운동량방정식

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial \xi} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial \xi} + \left(\frac{\partial \tau_{\xi\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{\xi r})}{\partial r} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial \xi} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{\partial \tau_{\xi r}}{\partial \xi} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial r} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right) \quad (3)$$

• 에너지방정식

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial \xi} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

2.2 고체구간의 지배방정식

$$\begin{aligned} & (\rho c)_{solid} (-V_{torch}) \frac{\partial T}{\partial \xi} \\ &= \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k_{solid} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_{solid} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서,

$$\tau_{\xi\xi} = \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right]$$

$$\tau_{rr} = \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right]$$

$$\tau_{\xi r} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \xi} \right]$$

$$\tau_{\theta\theta} = \mu \left[2 \frac{v}{r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right]$$

이상기체를 만족하는 밀도를 제외한 다른 물성치는 Weast와 Astle⁽¹³⁾과 Irvine과 Liley⁽¹⁴⁾로부터 온도의 함수로써 구하였다. 원관의 입구로 균일한 온도를 가진 균일한 유동이 유입된다고 가정하였으며 내부원관에서 축방향의 위치 $\xi_{injection}$ 을 중심으로 폭 5mm로 균일한 속도 $V_{injection}$ 와 균일한 온도 T_{inner} 로 제트가 분사되며 제트가 분사되는 지점을 제외한 내부원관의 표면온도는 T_{inner} 로 일정하다고 가정하였으며 경계조건을 다음과 같이 표시할 수 있다.

at $\xi=0$

$$u = U_{in} - V_{torch}, v = 0, T = T_{in}$$

at $\xi=2L$

$$\frac{\partial(u, v, T)}{\partial \xi} = 0$$

at $\xi < \xi_{injection} - 0.0025$ or $\xi > \xi_{injection} + 0.0025$

$$r = R_1$$

$$u = -V_{torch}, v = 0, T = T_{inner}$$

at $\xi_{injection} - 0.0025 < \xi < \xi_{injection} + 0.0025$

$$r = R_1$$

$$u = -V_{torch}, v = V_{injection}, T = T_{inner} \quad (6)$$

MCVD공정에서는 토치가 원관전체를 한번 이송한 후 다시 이송시작점으로 돌아와 같은 과정을 반복하게 된다. 이러한 반복적인 토치가열로 인하여 토치전방에 원관벽의 최소온도가 존재함이 실험적으로 밝혀져 있다.⁽⁴⁾ 원관벽의 온도는 토치가 지나간 후의 시간에 따라 달라지게 된다. 토치가 지나간 후의 시간은 현재 토치와의 거리에 비례하게 되므로 토치후방에서는 토치로부터 거리가 먼곳의 온도가 거리가 가까운 곳의 온도보다 낮게 된다. 그러나 토치의 전방은 전번 토치이송시에 가열되었으나 현재의 토치가 지나가지 않았으므로 그 온도 감소는 전번 토치가 지나간 후의 시간에 의존하게 될 것이다. 현재 토치위치 전방의 먼곳에 있는 원관벽은 전번토치가 가열한 후에 지난 시간이 짧기 때문에 현재 토치위치 전방의 가까운 곳보다 온도가 높아질 수 있다. 따라서 현재 토치위치의 전방에 최소온도가 존재하며 박경순⁽¹²⁾은 두개의 토치를 이용한 모델을 사용하여 최소온도를 예측할 수 있었다. 본 연구에서는 두개의 토치를 이용한 모델을 사용하여 전번 토치이송과 현재 토치이송으로 인한 토치 가열효과를 포함하였다. 해석하고자하는 원관을 확장한 2배 길이의 원관을 같은 속도로 움직이며 원관의 길이만큼 간격을 두고 있는 두개의 토치로 가열하는 모델을 고려하였다.⁽¹²⁾ 전방의 점선으로 표시된 토치는 전번이송에 의한 가열효과를 그리고 후방의 실선으로 표시된 토치는 현재 이송중인 토치에 의한 가열효과를 나타낸다. 토치에 의한 가열은 Gaussian분포의 열플럭스로 표현하였으며 두개의 토치 가열효과를 포함하여 외부원관의 외부표면에서의 경계조건을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & q_{max} \exp(-\lambda^2 [100(\xi - \xi_{torch})]^2 + \\ & q_{max} \exp(-\lambda^2 [100(\xi - (L + \xi_{torch}))]^2) \\ &= k \frac{\partial T}{\partial R} + h(T - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T^4 - T_{\infty}^4) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 ξ_{torch} 는 현재 이송중인 토치의 위치를

나타내고, $L + \xi_{torch}$ 는 전번 이상의 토치를 나타낸다. 두 인자, q_{max} 와 λ 는 토치의 가열조건을 나타낸다. λ 는 토치의 가열범위를 나타내는 인자로서 토치의 가열폭이 크다면 작은 값이 되고 가열폭이 작다면 큰값이 된다. q_{max} 는 연료의 유량과 관계가 되는 최대열유속을 가리킨다. 이러한 열유속조건의 장점은 다른 토치속도에서도 위의 인자값들을 그대로 사용할 수 있다는 점인데 원관의 온도를 경계조건으로 주는 이제까지의 접근방법은 토치속도가 달라지면 이에 따라 변하는 온도분포에 대한 측정을 필요로 하였다. 또 하나의 장점은 원관의 최소온도를 예측할 수 있다는 점이다. 일반적인 MCVD방법에서의 효율은 최소온도에 의존하므로 (Walker⁽⁴⁾ 등, $E=0.8[1-T_{min}/T_{rxn}]$) 각기 다른 운전조건에서의 최소온도의 예측은 매우 중요하다. 이러한 모델을 사용하여 일반적인 MCVD에 적용한 결과 원관의 온도분포를 잘 예측할 수 있다.⁽¹²⁾ 온도에 의존하는 열전달계수, $h(T)$ 는 Farouk과 Ball⁽¹⁵⁾ 그리고 Gardon⁽¹⁶⁾으로부터 구하였다.

투명한 외부원관벽(Fig. 1의 고체구간 1)에서는 확산근사^(17,18)를 적용한 복사효과를 고려하였다.

$$k_{solid} = k_{conduction} + \frac{16n^2\sigma T^3}{3\alpha} \quad (8)$$

여기에서 n 은 굴절률($n=1.5$)을 나타내고 σ 는 Stefan-Boltzmann 상수를 나타내며 α 는 Rosseland mean absorption coefficient($\alpha=4/cm$)⁽¹⁸⁾를 나타낸다.

외부원관의 내부표면에서는 내·외부원관사이의 표면 복사효과를 고려하였다. 미소면적에 대한 보기계수(shape function: $dF_{d_1-d_2}$)를 구한 다음에 이것을 적절한 각도에 대해서 합하여 전체 내·외부사이의 복사열유속을 구한다. (부록 참조) 실리카의 복사 물성치와 관련하여 손정욱⁽¹⁹⁾이 사용한 단순화된 band 근사⁽²⁰⁾ 즉, 실리카관은 $4.5 \mu m$ 이하의 파장에서는 투명하며 $4.5 \mu m$ 이상의 파장인 경우에는 흑체라는 근사를 적용하였다. 도달되는 모든 파장의 복사플럭스중 흡수되는 파장의 복사플럭스는 blackbody function, $F_{0-\lambda T}$ ⁽²⁰⁾를 사용하여 구하였다.

$$F_{0-\lambda T} = \frac{2\pi C_1}{\sigma T^4} \int_0^\lambda \frac{d\lambda}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad (9)$$

여기에서, C_1 과 C_2 는 프랑크의 스펙트럴 에너지분포 상수를 가리킨다. 따라서 복사효과를 고려한 외

부원관의 내부표면에서의 경계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{solid} = -k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{fluid} + \int_s (1-F_{0-4.57\lambda}) \sigma T_j^4 dF_{ak-dj} - (1-F_{0-4.57\lambda}) \sigma T_k^4 \quad \text{at } r=R_{2i} \quad (10)$$

입자는 반응기체가 반응온도(1300°C)에 도달하게 되면 생성된다고 가정하였다. 입자의 거동은 라그랑지의 기술법(Lagrangian description)을 사용하였으며 4th-order Runge-Kutta방법으로 해석하였다. 입자는 그 크기가 작고, 또한 반응기체에 비해 체적비가 작으므로 주유동에 열역동력 속도를 중첩한 속도로 이동된다고 보았다. 아래에 입자의 축방향속도, $\frac{d\xi}{dt}$ 와 반경방향속도, $\frac{dr}{dt}$ 를 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= u - \frac{Kv}{T} \frac{\partial T}{\partial \xi} \\ \frac{dr}{dT} &= v - \frac{Kv}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 K 의 값으로는 0.9를 사용하였다.⁽⁴⁾ 유동장 및 압력계산에 SIMPLER 알고리즘을 사용하는 유한체적법⁽²¹⁾을 사용하였다. 대류항을 계산하기 위하여 power law scheme을 사용하였으며 격자감도검사(grid sensitivity test)를 하여 계산결과가 격자의 간격에 의존하지 않는 격자시스템(15×218)를 사용하였다.

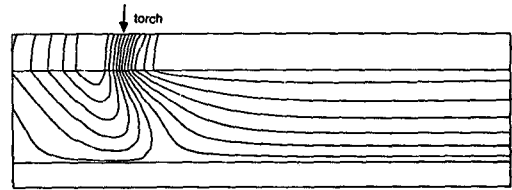
3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 환상형 MCVD방법에서 내부원관으로부터 반경방향으로 제트를 분사함으로써 불균일 부착길이를 줄이는 방법을 제안하며 제트분사가 열전달, 유체유동 및 입자이동에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 수치적 방법으로 연구하였다. 각 수치해석의 경우 $R_1=2 \text{ mm}$, $R_{2i}=9.5 \text{ mm}$, $R_{2o}=12.5 \text{ mm}$, $L=1 \text{ m}$, $\xi_{torch}=30 \text{ cm}$, $V_{torch}=15 \text{ cm/min}$, $\xi_{injection}=30.25 \text{ cm}$, $V_{injection}=2 \text{ m/sec}$, $T_{injection}=1273 \text{ K}$, $T_{in}=300 \text{ K}$, main flow rates=3l/min, $T_{max}=1900 \text{ K}$ 인 경우에 대해서 수행하였고 다른 조건에서 해석을 수행할 경우에는 달라진 조건만을 그림설명에 삽입하였다. 내부원관으로부터 반경방향으로 제트를 분사하게 되면 입자가 반경방향의 추가 속도성분을 얻게 되어 내부분사가 없는 경우보다

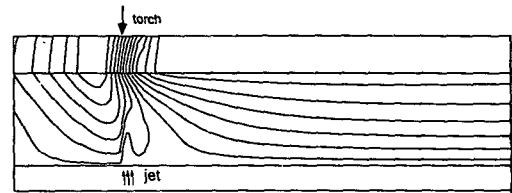
먼저 외부원관의 벽근처에 도달하게 되어 Tapered Entry를 줄일 수 있음을 아래에서 보일 것이다.

3.1 제트분사된 경우의 유선, 등온선, 입자궤적

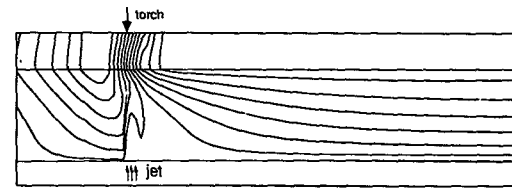
Fig. 2에서는 제트속도가 달라질 때 유선이 어떻게 달라지는가를 보여 주고 있다. 제트가 없는 경우(Fig. 2(a)) 즉, 일반적인 환상형 MCVD경우에서는 토치 전방에서 외부원관의 벽면온도가 급격히 감소하여 그 부근의 유체의 밀도가 증가하고 근처 유체가 축소되므로 유입유동이 발생하여 내부원관에서 외부원관방향으로의 속도성분이 생기게 된다. 이로 인해 토치 전방근처에서 생기는 유선의 변화를 Fig. 2(a)에서 볼 수 있다. Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 제트의 분사속도가 각각 2 m/sec, 4 m/sec인 경우의 유선을 나타낸 그림으로 제트속도가 높아짐에 따라 제트분사 위치에서 유선이 반경방향으로 급격하게 향하는 경향을 볼 수 있으며 어느정도 외부원관쪽으로 향하다가 다시 중심부분으로 돌아오는 유동이 생긴다. 토치후방에서 오는 유동이 제트분사의 영향으로 제트분사의 전방위치에서는 더욱 외부원관의 벽 근처에 밀접하여 이동된다. 예를 들어 Fig. 2(b)의 A의 유선을 살펴보면 입자가 A유



(a) No injection

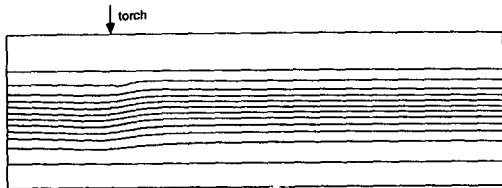


(b) 2 m/sec injection

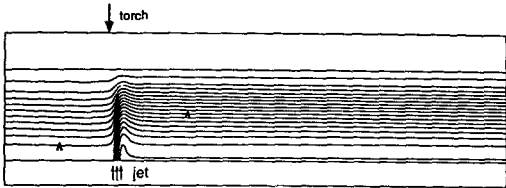


(c) 4 m/sec injection

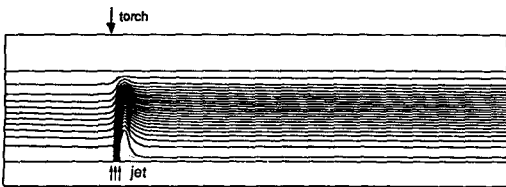
Fig. 3 Isotherms



(a) No injection

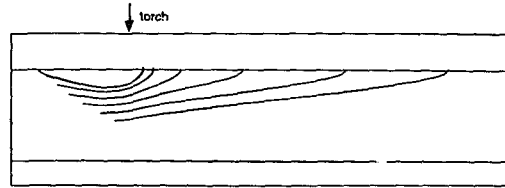


(b) 2 m/sec injection

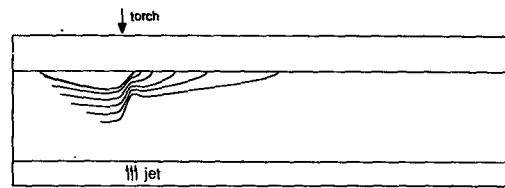


(c) 4 m/sec injection

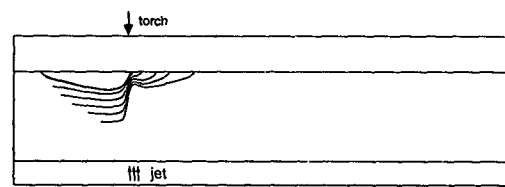
Fig. 2 Stream line patterns



(a) No injection



(b) 2 m/sec injection



(c) 4 m/sec injection

Fig. 4 Particle trajectories

선을 따라 움직인다면 제트분사의 후방에서는 내부 원관 근처에서 움직이던 입자가 내·외부원관사이의 중심부 근처로 이동되어 움직임을 알 수 있다. Fig. 3은 제트의 분사에 따라 변화하는 등온선을 나타낸 그림으로 제트의 속도가 높아짐에 따라 제트분사위치 근처에서의 등온선은 변화함을 볼 수 있으나 제트분사위치의 전방의 온도분포는 거의 변화하지 않음을 알 수 있다. Fig. 4에 입자의 궤적을 나타내었으며 제트의 속도가 커질수록 제트분사 위치에서 반경방향 속도성분을 얻게 되어 외부원관 쪽으로 향하게 되며 Fig. 2(b), (c)에서 볼 수 있는 다시 중심부로 향하는 작은 유동속도로 말미암아 약간 중심부쪽으로 이동되다가 열영동의 영향으로 다시 외부원관벽으로 움직이어 부착하게 되는 것을 볼 수 있다. 반경방향의 같은 지점에서 형성된 입자가 외부원관에 부착되는 축방향 지점이 제트가 없는 경우보다 제트가 있을때 현저하게 짧아져 결국 경사부착길이가 줄어들음을 알 수 있다. 즉 토치후방에서 생성된 입자는 제트분사 위치에서 반경방향의 큰 속도성분으로 인하여 외부원관 근처에 이르르게 되고 입자는 환상형원관의 지속적인 큰 온도구배로 인하여 축방향으로 멀리 진행하지 못하고 부착되어 불균일 부착길이가 매우 짧아질 수 있음을 의미한다.

3.2 표면복사의 영향

환상형원관에서 고온으로 가열되고 있는 내부원관과 외부원관의 표면복사의 영향을 고려하였다. Fig. 5(a)에 표면복사가 고려된 경우의 외부원관의 온도와 표면복사가 무시된 경우를 비교하였다. 토치근방의 외부원관의 최고온도를 1900 K으로 고정시킨 경우로서 복사를 고려한 경우나 고려하지 않은 경우나 토치전방의 온도가 급격히 감소하고 최저온도를 나타낸 후 다시 증가함을 볼 수 있다. 최저온도의 존재는 이미 박경순⁽¹²⁾에서 밝혔듯이 토치의 반복적인 가열효과로 인한 결과이며 Walker 등⁽⁴⁾에서도 실험적으로 입증되었다. 고온으로 가열되는 내부원관에서의 복사효과는 Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 토치의 전방에서 나타난다. 즉, 실선(복사효과가 고려된 경우)과 점선(복사효과가 고려되지 않은 경우)을 비교하면 토치전방에 존재하는 최저온도가 실선인 경우가 점선인 경우보다 약 100 K정도 높다 이는 표면복사가 외부원관의 온도를 상승시켰기 때문이다. 토치전방의 온도가 상승하면

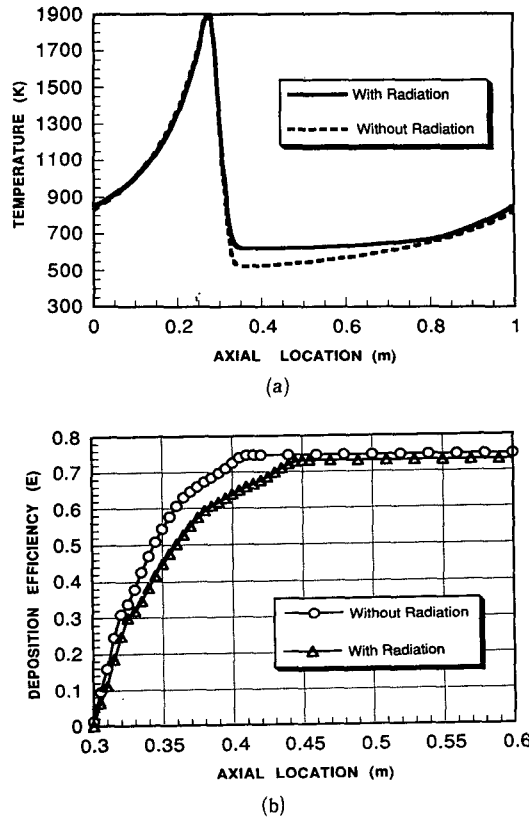


Fig. 5 (a) Wall temperature distributions
(b) Axial distribution of deposition efficiencies

열영동의 영향이 작아져 증착효율이 작아지고 축방향의 경사부착구간이 증가하게 된다. Fig. 5(b)에 증착효율을 축방향의 위치에 따라 나타내었는데 증착효율 $E(\xi)$ 는 주어진 $SiCl_4$ 의 유량으로 결정지어지는 형성가능한 총입자량과 ξ_{torch} 로부터 ξ 지점까지 부착된 입자량의 비로서 정의된다. (Lin 등⁽¹¹⁾) 복사가 고려되었을 때 효율이 약간 작아지고 Tapered Entry가 약 5cm정도 더 길어짐을 알 수 있다. 본 연구에서는 입자에 의한 복사효과가 증착성능에 미치는 영향이 고려되지 않았지만 입자유동으로 부터의 복사손실로 인하여 유동의 온도가 낮아지며 따라서 벽면에서의 온도구배가 작아져 증착효율이 감소될 것으로 사료된다. 이의 영향을 고려하기 위하여서는 미·적분방정식 형태의 복사열전달 방정식을 해석하여야 하는데 이를 위해서는 생성된 입자의 고온에서의 복사 물성치의 파악이 선행되어야 할 것이다.

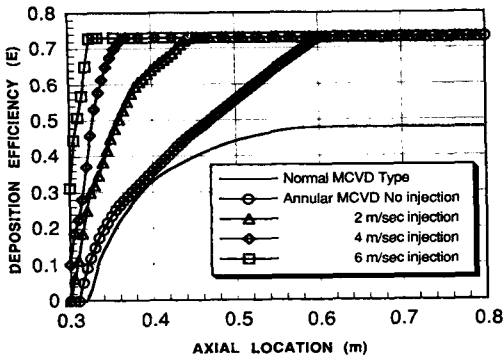


Fig. 6 Deposition efficiencies for different injection velocities

3.3 분사속도의 영향

환상형원관을 사용할 경우 반경방향의 큰 열영동력으로 인하여 생성된 입자는 거의 모두 부착하게 되어 입자생성효율과 증착효율은 동일하게 된다. 일반적인 수정된 화학증착공정(MCVD)과정에서는 생성된 입자 중 부착되지 않고 원관의 외부로 방출되는 입자가 있어 생성효율과 증착효율이 다르게 된다.^(4,11) 내부원관에서 제트분사가 있는 경우라 할지라도 토치후방에서의 유선이나 등온선의 변화는 거의 없으므로 (Fig. 2와 Fig. 3 참조) 제트분사가 토치의 후방에서 발생하는 입자의 생성에는 영향을 미치지 못한다. 따라서 제트의 속도가 변화하더라도 생성효율과 증착효율은 거의 변하지 않음을 Fig. 6에서 알 수 있다. 일반적인 MCVD는 약 50%의 증착효율을 나타내고 있으나 환상형원관 MCVD인 경우 70%를 넘는 효율을 보여주고 있다. 환상형 MCVD에서 제트의 속도를 증가하였을 때 증착효율은 변화하지 않으나 축방향의 불균일 부착길이가 현저하게 감소함을 보여주고 있다.

3.4 제트의 분사온도 및 위치의 영향

본 연구에서는 제트의 분사온도와 내부원관의 온도를 같다고 가정하였는데 분사온도는 내부원관 근처에서의 입자생성효율과 밀접한 관계가 있다. 즉, 분사온도가 화학반응온도(약 1300°C)보다 높으면 입자생성효율이 100%에 달하게 되고 분사온도가 낮아수록 생성효율이 감소된다. Fig. 7에 제트의 분사온도에 따른 효과를 나타내었다. 분사온도가 1500 K일 때 97%의 증착효율을 보이고 있으며 1273 K일 때 약 70%의 증착효율을 보이나 낮은 온도 즉, $T_{injection}=800\text{ K}, 600\text{ K}$ 에서는 일반적인

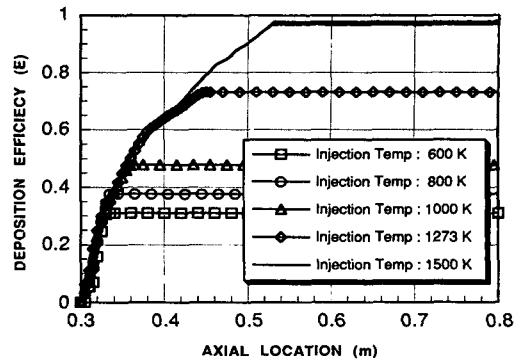


Fig. 7 Deposition efficiencies for different injection temperatures

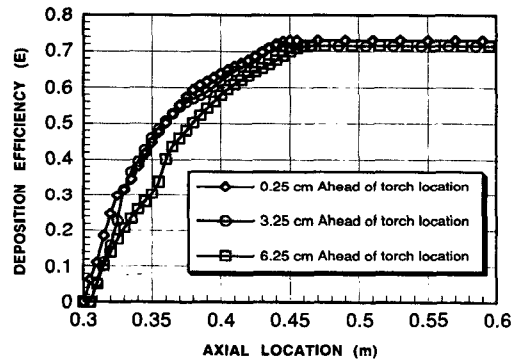


Fig. 8 Deposition efficiencies for different injection locations

MCVD의 증착효율인 50%보다 더 낮은 값을 보이고 있다.

제트분사위치가 증착효율에 미치는 영향을 고려하기 위하여 세가지의 다른 위치에서의 제트분사효과를 연구하였다. 토치전방 0.25 cm, 3.25 cm, 6.25 cm에서 분사하는 경우 증착효율을 Fig. 8에 나타내었으며 증착효율은 거의 같은 값을 보이고 Tapered Entry도 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서 제트의 분사위치를 넓은 범위에서 정하여도 거의 같은 증착성능을 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

환상형 원관을 사용한 MCVD방법은 반경방향으로의 지속적인 내·외부 원관사이의 온도구배로 인해 열영동력이 커져서 입자부착효율은 높아지나 내부원관의 존재로 인해 최고속도가 증가하므로 불균일 부착길이가 길어질수 있다. 본 논문에서는 환상

형 MCVD방법에서 내부원관으로부터 제트를 분사하여 축방향속도의 증가에 대응하는 반경방향의 속도를 줌으로써 불균일 부착길이를 효과적으로 줄일 수 있는 방법을 제안하였으며 제트분사가 열전달, 유체유동 및 입자이동에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 토치후방에서 오는 입자유동이 제트분사의 영향으로 제트분사의 전방에서는 외부원관의 벽근처로 이동되며 축방향으로 얼마 이동하지 못하고 원관의 내벽에 부착하게 된다. 따라서 내부원관으로부터의 반경방향 제트분사는 불균일 부착길이를 현저하게 줄임을 알 수 있다.

(2) 내·외부원관사이의 표면복사는 토치전방이 외부원관의 온도를 본 연구의 범위내에서는 약 100 K정도 올리고 이로 인하여 증착효율이 낮아지고 경사부착구간이 늘어나게 된다.

(3) 분사속도를 증가시킬수록 경사부착구간의 길이가 현저하게 줄어든다.

(4) 제트의 분사온도는 증착효율에 큰 영향을 미쳐 1273 K일 때 약 70%의 증착효율을 보이며 800 K일 때는 50%이하의 값을 나타낸다.

(5) 제트의 분사위치가 증착효율과 경사부착구간에 미치는 영향은 적다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호 : 921-0900-004-2)에 의하여 이루어졌으며, 지원에 감사

를 드립니다.

부 록

1. 내부원관에서 외부원관으로의 보기계수(A1)

$$dF_{dj-dk} = \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi s^2} dA_k$$

$$s = \overline{AB'} = \sqrt{R_1^2 \sin^2 \delta + (R_1 \cos \delta - R_2)^2 + \Delta l^2}$$

$$\cos\theta_1 = \frac{\overline{AB} \cdot \overline{AB'}}{|\overline{AB}| |\overline{AB'}|}$$

$$= \frac{-(R_1 \cos \delta - R_2)}{\sqrt{(R_1^2 \sin^2 \delta + (R_1 \cos \delta - R_2)^2 + \Delta l^2)}}$$

$$\cos\theta_2 = \frac{\overline{B'A} \cdot \overline{B'O'}}{|\overline{B'A}| |\overline{B'O'}|}$$

$$= \frac{R_1 \sin^2 \delta + \cos \delta (R_1 \cos \delta - R_2)}{\sqrt{(R_1^2 \sin^2 \delta + (R_1 \cos \delta - R_2)^2 + \Delta l^2)}}$$

$$dF_{dj-dk} = \frac{-(R_1 \cos \delta - R_2) \{R_1 \sin^2 \delta + \cos \delta (R_1 \cos \delta - R_2)\}}{\pi \{(R_1^2 \sin^2 \delta + (R_1 \cos \delta - R_2)^2 + \Delta l^2)^2} dA_k$$

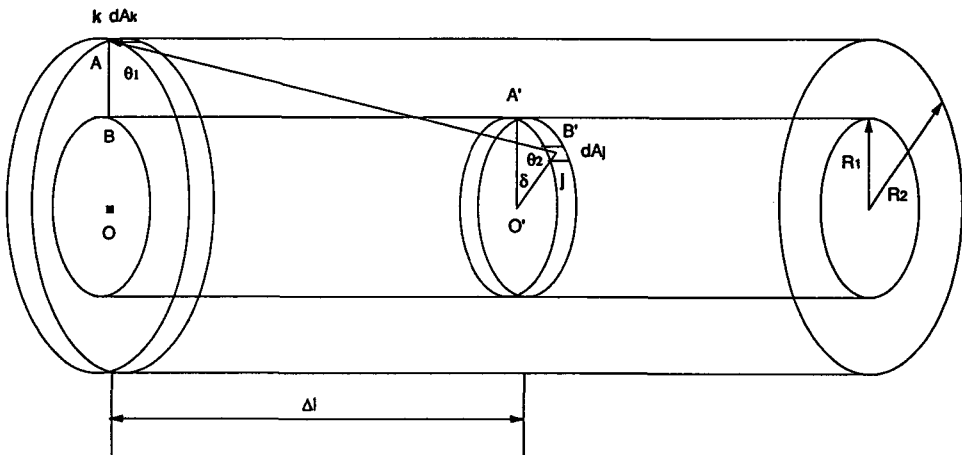
$$dF_{dk-dj} = dF_{dj-dk} dA_j / dA_k$$

dA_k 가 dA_j 를 보는 범위가 한정되어 있으며 이는 δ 의 최대·최소값이 존재함을 의미한다. 즉 δ 는 $\delta > |\cos^{-1}(R_1/R_2)|$ 일 때 dF_{dj-dk} 는 영이다.

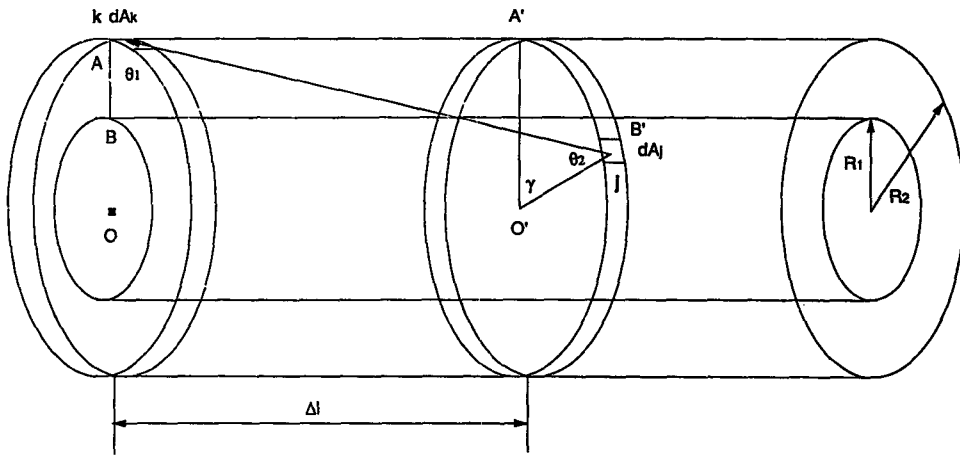
2. 외부원관에서 외부원관으로의 보기계수(A2)

$$dF_{dj-dk} = \frac{-R_2^2 (\cos \gamma - 1) \{ \sin^2 \gamma + \cos \gamma (\cos \gamma - 1) \}}{\pi \{(R_2^2 \sin^2 \gamma + R_2^2 (\cos \gamma - 1)^2 + \Delta l^2)^2} dA_k$$

γ 가 $\gamma > |2\cos^{-1}(R_1/R_2)|$ 일 때 dF_{dj-dk} 는 영이다.



A1 Radiative exchange between inner and outer tubes



A2 Radiative exchange between areas of an outer tube

참고문헌

- (1) MacChesney, J. B., O'Connor, P. B., DiMarcello, F. V., Simpson, J. R. and Lazay, P. D., 1974, "Preparational Low-Loss Optical Fibers Using Simultaneous Vapor Phase Deposition and Fusion," Proc. 10th Proc Int. Congr. Glass. 10th, Kyoto, Japan, pp. 640~644.
- (2) MacChesney, J. B., O'Connor, P. B., Presby, H. M., 1974, "A New Technique Preparation of Low-Loss and Graded Index Optical Fibres," Proc. IEEE, 62, pp. 1278~1279.
- (3) Simpkins, P. G., Kosinski, S. G., and MacChesney, J. B., 1979, "Thermophoresis: The Mass Transfer Mechanism in Modified Chemical Vapor Deposition," J. Appl. Phys., 50, pp. 5676~5681.
- (4) Walker, K. L., Geyling, F. T., and Nagel, S. R., 1980, "Thermophoretic Deposition of Small Particles in the Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD)Process," J. Am. Ceram. Soc., 63, pp. 552~558.
- (5) Wang, C. Y., Morse, T. F. and Cipolla, Jr. J. W., 1985, "Laser Induced Natural Convection and Thermophoresis," ASME J. Heat Transfer, Vol. 107, pp. 161~167.
- (6) Morse, T. F., Digiovanni, D., Chen, Y. W. and Cipolla, Jr. J. W., 1986, "Laser Enhancement of Thermophoretic Deposition Process," J. of Lightwave Technology, LT-4, No. 2, Feb. 1986, pp. 151~155.
- (7) Kim, K. S. and Pratsinis, S. E., 1990, "Codeposition of SiO₂/GeO₂ during Production of Optical Fiber Preforms by Modified Chemical Vapor Deposition," Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 33, No. 9, pp. 1977~1986.
- (8) Fiebig, M., Hilgenstock, M. and Rieman, H.-A., 1988, "The Modified Chemical Vapor Deposition Process in a Concentric Annulus," Aerosol Science and Technology 9, 237~249.
- (9) Choi, M., Lin, Y. T. and Greif, R., 1990, "Analysis of Buoyancy and Tube Rotation Relative to MCVD Process," ASME J. Heat Transfer, 112, pp. 1063~1069.
- (10) Lin, Y. T., Choi, M. and Greif, R., 1991, "A Three Dimensional Analysis of the Flow and Heat Transfer for the Modified Chemical Vapor Deposition Process Including Buoyancy, Variable Properties and Tube Rotation," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 113, No. 2, pp. 400~406.
- (11) Lin, Y. T., Choi, M. and Greif, R., 1992, "A Three Dimensional Analysis of Particle Deposition for the Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD) Process," ASME J. of Heat Transfer, Vol. 114, No. 3, pp. 735~742.
- (12) 박경순, 1993, "Modified Chemical Vapor Deposition 공정에서 토치이송속도와 원관두께가

- 입자의 부착에 미치는 영향,” 서울대학교, 공학 석사학위논문.
- (13) Weast, R. C. and Astle, M. J., 1981, “CRC Handbook of Chemistry and Physics,” CRC Press Inc., 61st Ed.
- (14) Irvine, T. F. and Liley, Jr. P. E., 1984, “Steam and Gas Tables with Computer Equations,” Academic Press, pp. 161~165.
- (15) Farouk, B. and Ball, K. S., “Convective Flows around a Rotating Isothermal Cylinder,” Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 10, pp. 1921~1935.
- (16) Gardon, R., 1961, “A Review of Radiant Heat Transfer in Glass,” J. Am. Ceram. Soc., Vol. 44, No. 7, pp. 305~313.
- (17) Paek, U. C. and Runk, R. B., 1978, “Physical Behavior of the Neck-down Region during Furnace Drawing Silica Fibers,” J. Appl. Phys., 49(8), August, pp. 4417~4423.
- (18) Homsy, G. M. and Walker, K. L., 1979, “Heat Transfer in Laser Drawing of Optical Fibers,” Glass Technol., Vol. 20, No. 1, pp. 20~26.
- (19) 손정욱, 1992, “급속 고온처리장치에서의 복사열전달 연구,” 서울대학교, 공학석사학위논문.
- (20) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, Thermal Radiation Heat Transfer, 3rd Edition, Hemisphere Publishing Corporation.
- (21) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat and Fluid Flows, Hemisphere Publishing Corporation, New York.