

〈論 文〉

## 수정된 화학증착과정에서 토치이송과 고체층이 열전달과 입자부착에 미치는 영향

박경순\* · 최만수\*\*

(1993년 10월 23일 접수)

### Effect of Torch Speed and Solid Layer Thickness on Heat Transfer and Particle Deposition During Modified Chemical Vapor Deposition Process

Kyong Soon Park and Mansoo Choi

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

#### Abstract

A study of heat transfer and thermophoretic particle deposition has been carried out for the Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD) process. A new concept utilizing two torches is suggested to simulate the heating effects from repeated traversing torches. Calculation results for the wall temperatures and deposition efficiency are in good agreement with experimental data. The effects of variable properties are included and heat flux boundary condition is used to simulate the moving torch heating. A conjugate heat transfer which includes heat conduction through solid layer and heat transfer in a gas in a tube is analyzed. Of particular interests are the effects of torch speeds and solid layer thicknesses on the deposition efficiency, rate and the tapered entry length.

— 기 호 설 명 —

<p><math>C_p C_{solid}</math> : 유체의 정적비열, 고체의 비열 [kJ/kg · K]</p> <p><math>E_T</math> : 총 효율</p> <p><math>E_T(\xi)</math> : 증착효율</p> <p><math>h</math> : 대류 열전달계수 [W/m<sup>2</sup>·K]</p> <p><math>k, k_{solid}</math> : 유체의 열전도도, 원관의 열전도도 [W/m·K]</p> <p><math>n</math> : 굴절율</p> <p><math>q_{wall}</math> : 원관표면에서의 열유속 [W/m<sup>2</sup>]</p> <p><math>q_{max}</math> : 최대 열유속 [W/m<sup>2</sup>]</p> <p><math>r</math> : 반경방향좌표 [m]</p> <p><math>R_i</math> : 원관의 내경 [m]</p> <p><math>R_o</math> : 원관의 외경 [m]</p>	<p><math>t</math> : 시간 [sec]</p> <p><math>T</math> : 온도 [K]</p> <p><math>T_{max}</math> : 원관표면의 최고온도 [K]</p> <p><math>T_e</math> : 평형온도 [K]</p> <p><math>T_{min}</math> : 최소 원관온도 [K]</p> <p><math>T_{rxn}</math> : 화학반응온도 [K]</p> <p><math>T_\infty</math> : 주위대기의 온도 [K]</p> <p><math>u</math> : 축방향속도 [m/s]</p> <p><math>U_{av}</math> : 유체의 평균속도 [m/s]</p> <p><math>v</math> : 반경방향속도 [m/s]</p> <p><math>V_{torch}</math> : 토치속도 [m/s]</p> <p><math>x</math> : 축방향 절대좌표 [m]</p>
---	---

\*정회원, 서울대학교 대학원

\*\*정회원, 서울대학교 기계공학과

그리스문자

$\alpha$  : Rosseland mean absorption coefficient [cm<sup>-1</sup>]

- $\lambda$  : 열유속 분포계수  
 $\mu$  : 점성계수[ $\text{kg/m} \cdot \text{sec}$ ]  
 $\rho, \rho_{\text{solid}}$  : 유체의 밀도, 원관의 밀도[ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $\sigma$  : 슈테판-볼츠만상수[ $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]  
 $\xi$  : 축방향 이동좌표[m]  
 $\xi_{\text{torch}}$  : 토치위치[m]

## 1. 서 론

수정된 화학증착(modified chemical vapor deposition)<sup>(1,2)</sup>과정 중 발생하는 열전달 및 입자부착에 관한 연구를 수행하였다. 수정된 화학증착은 현재 널리 사용되는 고품질의 광섬유를 제조하는 방법으로 간략히 설명하면 다음과 같다. 회전하는 실리카 원관안으로  $\text{SiCl}_4$ 와  $\text{O}_2$ 를 포함하는 화학 혼합가스를 주입하고 이 원관의 외부를 축방향으로 이송되는 수소·산소토치로 가열한다. 토치가열로 인하여 원관안의 혼합가스가 가열되고 화학반응이 일어나 미세한 입자가 형성되고 이 입자들이 혼합가스와 함께 움직이다가 원관의 내벽에 부착하게 된다. 토치가 원관전체를 한번 이송할 때 한층의 부착막을 얻게 되며 광섬유가 가져야 할 굴절율의 분포를 조절하기 위하여 화학가스의 조성을 변화시키면서 반복적으로 수십층을 부착시키게 된다. 부착이 종료된 후 토치온도를 높여 원관을 수축시켜서 원봉모양의 모재를 완성하고 이 모재를 가열로에서 인발하여  $125 \mu\text{m}$  직경의 광섬유를 제조하게 되는 것이다.

수정된 화학증착과정에서의 입자부착 메카니즘은 열영동(thermophoresis)<sup>(3)</sup>으로서 이는 온도구배가 있는 가스 중에 미세한 입자가 존재할 때 입자와 기체분자와의 상호 운동량 교환으로 입자가, 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 힘을 받아 움직이는 것을 말한다. Walker 등<sup>(3)</sup>은 수정된 화학증착에 관하여 수치해석적 연구와 실험적 연구를 수행하여 총 효율과 원관온도와의 상관관계를 제시하였다. 화학증착효율의 향상을 위하여 레이저를 이용하는 방법을 Wang 등<sup>(4)</sup>과 More 등<sup>(5)</sup>이 제안하였으며 화학반응과 실리카입자 역학을 고려한 해석을 Kim과 Pratsinis<sup>(6)</sup>가 수행하였다. 원관의 회전과 부력의 영향을 Choi 등<sup>(7)</sup>과 Lin<sup>(8,9)</sup> 등이 연구하였다.

지금까지의 대부분의 연구에서는 입자부착으로 두꺼워지는 원관의 고체층의 두께와 토치의 이송속

도가 입자부착에 미치는 영향을 고려하지 않았다. 실제 광섬유 제조공정에서 토치의 이송속도와 가열 효과가 중요한 공정인자이므로 토치이송속도와 고체층 두께의 영향을 파악하는 것은 기존 공정의 최적화에 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이송토치의 속도와 부착층을 포함하는 원관 고체층이 화학증착과정 중 입자부착에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 여러층을 부착시키기 위하여 토치가 반복 이송하게 되는데 이는 원관의 반복적 가열을 의미하고 이로 인하여 토치전방에 최소온도가 존재하게 된다. Walker 등<sup>(3)</sup>은 이를 실험적으로 입증하였으며 이 최소온도가 총 효율과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다. 그러므로 여러 다른 조건에서 이 최소온도를 예측하는 것이 중요하며 본 연구에서는 반복 가열효과를 고려하기 위하여 두개의 토치를 사용하는 새로운 모델<sup>(10)</sup>을 제안하며 이를 사용한 계산결과를 기존의 실험과 비교하였다.

## 2. 해 석

Fig. 1에 본 연구에서 사용된 모델을 나타내었으며  $R_i$ 와  $R_o$ 는 각각 원관의 내경과 외경이다. Lin 등<sup>(9)</sup>의 결과에서 알 수 있듯이 회전속도가 작을 경우에는 부력과 원관회전으로 인한 3차원 효과가 중요하여 원주방향으로 입자부착의 변화가 있으나 축방향으로의 부착분포에는 변화가 미미하다. 그러나 정상적인 회전속도, 즉 60~120 rpm인 경우에는 원주방향으로 거의 균일한 입자부착이 이루어지므로 정상속도의 회전을 고려하는 본 연구에서는 원주방향의 변화량을 무시한다. Walker 등<sup>(3)</sup>은 3차원 효과를 무시한 2차원 해석으로 실험결과와 상당히 일치하는 결과를 내었다. 따라서 본 연구에서는 원관의 회전과 부력을 무시한 축대칭 2차원 유동 및 열전달을 고려하였다. 온도에 따라 변화하는 물성치의 영향을 고려하였으며 원관의 고체층 및 원

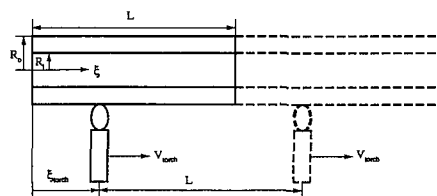


Fig. 1 Sketch of the system

관내부에서 일어나는 열전달을 함께 고려하는 연계 열전달(conjugate heat transfer) 문제를 수치적으로 해석하였으며 물성치는 Weast와 Astle<sup>(11)</sup> 그리고 Irvine 등<sup>(12)</sup>으로부터 구하였다.

조재결<sup>(13)</sup>은 원관벽에서의 온도를 측정하였으며 측정된 지점이 어느 위치에 있던지 토치로부터 떨어진 거리가 같다면 같은 온도가 나타남을 보여주고 있다. 따라서 토치와 같은 속도로 움직이는 이동좌표계  $\xi(\xi=x-V_{torch} \cdot t)$ 에서 준정상상태를 가정할 수 있으며 지배방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다. ( $x$ 는 축방향 절대좌표계)

○ 연속방정식

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

○ 운동량방정식

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

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

○ 에너지방정식

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial \xi} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( k \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} \tau_{\xi\xi} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial u}{\partial \xi} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right] \\ \tau_{rr} &= \mu \left[ 2 \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right] \\ \tau_{r\xi} &= \mu \left[ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \xi} \right] \\ \tau_{\theta\theta} &= \mu \left[ 2 \frac{v}{r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot V) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \xi &= -\infty; \\ u &= 2U_{av} \left( 1 - \left[ \frac{r}{R_i} \right]^2 \right) - V_{torch}, \\ v &= 0, \quad T = 0, \quad T = T_{\infty} \end{aligned} \quad (5a)$$

$$\begin{aligned} \xi &= \infty; \\ \frac{\partial(u, v, T)}{\partial \xi} &= 0 \end{aligned} \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} r &= 0; \\ u, v, T &\text{는 유한값} \end{aligned} \quad (5c)$$

$$r = R_i;$$

$$u = -V_{torch}, \quad v = 0, \quad \text{온도와 열유속의 연속성} \quad (5d)$$

원관의 본래 두께와 입자부착층을 포함한 고체층에서의 열전도를 지배하는 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} (\rho c)_{solid} (-V_{torch}) \frac{\partial T}{\partial \xi} \\ = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( k_{solid} \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_{solid} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

토치의 반복이송으로 인하여 토치 앞부분의 원관 온도분포에서 최소온도가 존재하게 된다. 한개의 토치를 사용하는 모델을 사용하면 토치의 앞부분은 토치가 지나가지 않았으므로 토치근방을 제외한 원관의 온도가 대기온도와 같게 된다. 그러나 실제로는 토치의 앞부분은 전번 토치의 이송시에 가열되었으므로 대기온도보다 높은 온도를 유지하고 있다. Walker 등<sup>(3)</sup>은 원관의 온도를 측정하였는데 토치의 앞부분에서 최고온도로부터 급격하게 감소되며 최소온도를 나타낸 후 다시 점진적으로 증가하는 분포를 나타내고 있다. 이것은 전번 토치 이송시의 가열로 인한 결과이다. 전번 토치이송시의 가열효과를 고려하기 위하여 두개의 토치를 사용하는 모델을 제안한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 원관의 길이만큼 떨어져 있고 같은 속도로 움직이고 있는 실선으로 표시된 토치와 점선으로 표시된 토치가 있다. 점선으로 표시된 토치는 전번 토치 이송시의 가열을 나타내며 실선으로 표시된 토치는 현재의 토치가열을 나타낸다. 준정상상태하에서는 토치의 가열로 인한 원관의 온도분포가 움직이는 토치와의 거리에 관련된다. 즉 토치가 가열한 후 경과된 시간에 따라 원관의 온도가 결정된다. 토치 후방에서 멀리 떨어진 부분은 토치의 가열을 받은 후 오랜 시간이 지났으므로 토치후방 근처 원관의 온도보다 낮은 온도를 갖게 되는 것이다. 현재 토치(Fig. 1의 실선토치)의 전방부분은 금번 토치의 가열은 없었으나 전번 토치이송(점선 토치)에 의하여 이미 가열되었다. 그러므로 점선으로 표시된 토치와의 거리에 따라서 전번토치로 인한 가열 이후의 시간이 결정된다. 예를 들면  $\xi=L$  부분은 전번 토치가 가열한 후 시간이 얼마 지나지 않았으므로 전번토치가 가열하고 시간이 많이 지난 현재토치 전방부분보다 원관의 표면온도가 높아지게 된다. 따라서 현재 토치의 위치와 전번토치의 위치 사이에 최소온도가 존재하게 되며 Walker 등<sup>(3)</sup>은 이것

을 실험적으로 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 두개의 토치를 사용하는 모델은 이러한 물리적 현상을 예측할 수 있으며 그 계산결과는 결과 및 토치의 부분에서 실험측정치와 비교될 것이다.

각 토치의 가열은 기존에 많이 사용되던 원관 온도 경계조건 대신에 열유속조건을 사용하여 모사하였다.<sup>(10)</sup>

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

여기에서,  $\xi_{\text{torch}}$ 는 현재 토치의 위치이며  $\xi_{\text{torch}} + L$ 은 전번 토치의 위치이다. 온도에 의존하는 열전달 계수  $h(T)$ 는 Farouk과 Ball<sup>(14)</sup> 그리고 Gardon<sup>(15)</sup>으로 부터 구하였다. 두개의 인자  $\lambda$ 와  $q_{\max}$ 는 주어진 토치의 가열을 특성화하는 인자인데  $\lambda$ 는 토치가 열의 폭을 결정하여 주며  $q_{\max}$ 는 연료의 양에 따른 최고 열유속을 의미한다.  $\lambda$ 의 수치가 작을 경우 넓은 범위의 가열을 나타내며, 클 경우는 국소적인 집중가열을 나타낸다. 토치의 설계와 연료의 유량으로 결정되는 토치의 가열조건이 주어지면 위의 두 인자 즉,  $\lambda$ 와  $q_{\max}$ 가 결정되며 이 인자들은 여러 다른 공정조건하에서도 같은 값을 갖는다. 즉 토치의 속도가 다른 경우와 고체층 두께가 다른 경우에도 같은 토치와 같은 연료의 양을 사용하면  $\lambda$ 와  $q_{\max}$ 는 변하지 않을 것이다. 기존의 연구에서 사용하였던 온도 경계조건은 각 공정조건에 따라 달라지므로 별도의 실험적인 측정결과가 해석에 선행적으로 필요하게 된다.

Paek과 Runk<sup>(16)</sup> 그리고 Homsy와 Walker<sup>(17)</sup>는 투명한 실리카 고체층에서의 복사열전달 효과를 고려하기 위하여 Rosseland diffusion근사<sup>(18)</sup>를 사용하였으며 본 연구에서도 같은 근사를 적용한다. 고체 실리카내의 복사열전달 효과를 보다 정확하게 다루기 위하여서는 적분·미분 복사전달방정식을 해석하여야 하나 본 연구에서는 다루지 않았다. Rosseland의 diffusion근사를 사용하면 복사열전달 효과를 온도에 의존하는 열전도로 대체할 수 있으며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(18)</sup>

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

여기서,  $n$ 은 굴절률( $n=1.5$ )이며  $\alpha$ 는 Rosseland 평균 흡수계수( $\alpha=4/\text{cm}^{(17)}$ )이다.

토치 근처에서 가스 온도가 화학반응온도( $T_{rxn}$ )를 넘게되고 화학반응이 일어나 입자가 형성된다. 실제 측정된 입자의 크기는  $O(0.1 \mu\text{m})$  정도인데 이 크기 범위 안에서는 입자의 중력으로 인한 자유낙하 속도가  $10^{-2} \text{mm/sec}$ 이고 정전기적인 힘을 무시할 수 있음이 알려져 있다.<sup>(19)</sup> 또한 입자의 확산 계수  $D$ 가 매우 작아 Schmidt수( $Sc = \nu/D$ )가  $10^6$  정도이고 열영동력계수는 1정도로써 입자에 미치는 브라운 확산력은 원관내벽의 매우 얇은 층을 제외하고는 열영동효과에 비하여 무시할 수 있다.<sup>(19)</sup> 이상으로부터 입자에 미치는 외력은 열영동력이 주된 힘임을 알 수 있고 입자의 궤적을 Lagrangian 운동 기술로서 계산할 수 있다.<sup>(3,4,9)</sup> 혼합가스의 온도가  $T_{rxn}$ 에 도달하게 되는 지점에 입자가 형성된다고 가정하였으며 입자의 속도는 온도에 의존하는 열영동으로 인한 속도와 대류로 인한 유체속도를 중첩시킨 다음의 식으로 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$\frac{d\xi}{dt} = u - \frac{K\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (9a)$$

$$\frac{dr}{dt} = v - \frac{K\nu}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (9b)$$

여기에서,  $\frac{d\xi}{dt}$ 와  $\frac{dr}{dt}$ 는 각각 입자의 축방향, 반경방향 속도이며  $K$ 의 값으로 0.9를 취하였다.<sup>(3,9)</sup>

SIMPLER방법<sup>(20)</sup>과 2nd order upwind차분방식<sup>(20)</sup>을 수치계산에 사용하였다.  $(13 \times 137)$ ,  $(15 \times 200)$ ,  $(26 \times 274)$ 의 다른 격자시스템을 사용하여 계산을 수행하였으며 벽면의 온도와 증착효율면에서  $(26 \times 274)$ 와  $(15 \times 200)$ 이 2% 이내의 결과를 나타내었으므로  $(15 \times 200)$  격자시스템을 본 연구의 계산에 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

수치계산결과를 Walker 등<sup>(3)</sup>의 실험결과와 비교하였다. 본 연구의 모델에서 원관의 온도는 미리 주어지는 것이 아니고 기체의 운동량 및 에너지방정식 그리고 고체층에서의 열전도방정식을 해석하여 구하였다. Fig. 2에 그 계산결과를 비교하여 나타내었으며  $q_{\max}=6.5 \times 10^5 \text{W/m}^2$ 과  $\lambda=0.5$ 인 경우 잘 일치함을 보여주고 있다. 두개의 인자  $q_{\max}$ 와  $\lambda$ 는 여러가지 다른 공정조건 즉, 다른 토치이동속도, 다른 고체층의 두께 등에서도 사용할 수 있다. 기존의 연구에서 사용되었던 온도 경계조건은 매

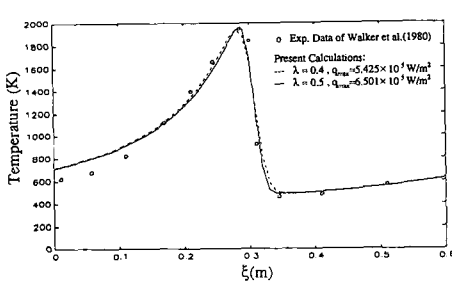


Fig. 2 Wall temperature distribution ( $R_i=7$  mm,  $R_o=8$  mm,  $L=0.67$  m,  $\xi_{torch}=30$  cm,  $V_{torch}=25$  cm/min,  $Q=31$ /min,  $T_{max}=1943$  K,  $T_{\infty}=300$  K)

경우마다 주어져야 하며 실험적 측정이 요구된다.

Fig. 2에서 볼수 있듯이 토치의 전방 약  $\xi=0.338$  m에서 원관의 최소온도가 존재함을 알 수 있다.  $\xi > 0.338$  m에서 온도가 점진적으로 증가함을 볼 수 있는데 이는 전번 토치이송시의 가열로 인한 결과이다. 본 연구에서 제안하고 있는 두개의 토치를 이용한 모델이 최소온도의 존재를 비교적 잘 예측하고 있다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이 두개의 토치는 원관의 길이만큼 떨어져서 같은 속도로 움직이고 있으며 점선으로 표시된 토치는 전번 이송시의 가열을 의미하고 실선 토치는 현재의 토치가열을 나타낸다. 하나의 토치만을 사용하면 토치전방의 최소온도를 예측할 수 없다. 이 최소온도는 총효율과 밀접한 관계(즉, Walker 등<sup>(3)</sup>은  $E_T = 0.8(1 - T_{min}/T_{rxn})$ 를 제안하였다.)가 있으며 본 연구의 두개의 토치를 이용한 모델은 여러 공정조건에서의 최소온도를 예측할 수 있다. 토치 전방의 최소온도가 총 효율에 영향을 미치는 이유를 설명하면 다음과 같다. 토치후방의 가스의 온도는 점진적으로 증가하며 토치 근처에서 최대온도를 가지게 되며 화학반응을 일으켜 입자를 만들게 된다. 토치의 전방에서는 가스의 온도가 서서히 감소하며 (현재 토치가 가열하지 않은) 원관의 온도는 급격히 감소한다. 따라서 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 작용하는 열영동으로 인한 힘은 원관의 벽으로 향하여 입자가 부착하게 되는 것이다. 토치 전방의 원관의 온도는 최소온도를 가진 후 전번 토치의 가열로 인하여 다시 증가한다. 따라서 가스의 온도보다 원관의 온도가 높아질 수 있으며 이 경우 열영동력은 입자를 원관의 중심방향으로 움직이게 하므로 더 이상의 부착이 이루어지지 않는다. 반경 방향의 온도구배 즉,  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R}$  가 0인 지점을 본 논문

에서는  $T_e$ 로 정의하였다.  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R} = 0$ 인 지점의 후방이면서 토치의 전방위치에서는  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R_i} < 0$  이므로 입자가 부착되며  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R_i} = 0$  인 지점의 전방에서는  $\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{r=R_i} > 0$  이 되므로 입자가 부착될 수 없다. Table 1에 여러 다른 공정조건하에서의  $T_e$ 를 나타내었는데 Walker 등<sup>(3)</sup>이 사용한 원관 (14×16 mm)에 대해서 계산하지 않고 현재 산업체에서 사용되는 원관(19×25 mm)에 대하여 계산을 수행하였다. 주입된 양과 화학반응에 도달하여 입자가 형성된 양의 비율이 입자생성효율로 정의되었고 총효율은 주입된 양과 부착된 입자의 양의 비율을 말한다. 증착효율은 기체의 유입량으로 부터 생성될 수 있는 최대 입자질량에 대하여,  $\xi=0$ 에서 부터  $\xi$ 까지 증착된 입자 질량의 비율을 의미하고 있어  $\xi$ 의 함수로 나타나게 된다. 토치 전방에 입자가 부착되므로  $\xi=0.3$ 의 후방의 증착효율  $E(\xi)$ 는 영이며  $\xi=0.3$ (토치위치)의 전방에서는 입자부착이 있으며  $\xi$ 가 증가할 수록  $\xi$ 까지 부착된 총 입자의 질량이 증가하므로  $E(\xi)$ 가 증가한다. 위에서 언급한  $T_e$ 의 온도를 나타내는 지점의 전방에서는 입자부착이 이루어지지 않으므로 더 이상의 입자 부착 질량이 증가하지 않으며 따라서 그 위치 앞부분에서는  $E(\xi)$ 가 일정하게 된다. 부착된 입자층의 두께는 토치의 초기 이동 시작점 전방부터 증가하기 시작하여 축방향 어느 지점에 도달하게 되면 두께가 0으로부터 일정한 크기(최대두께)에 도달하는데 본 연구에서는 최대두께의 95%에 달하는 지점까지의 거리를 불균일 부착길이로 정의하여 Table 1에 나타내었다. Walker 등<sup>(3)</sup>에서 실험에 사용한 조건(Fig. 2에 명기)에 대하여 총 효율을 계산하였는데 계산치(53%)와 실험치(56%) (Walker 등<sup>(3)</sup>)가 잘 일치하였다.

본 연구에서는 고체층의 두께는 3 mm에서 4 mm, 토치이송속도는 10 cm/min 에서 20 cm/min, 유량은 2 l/min에서 4 l/min 그리고 최대 원관표면온도를 1800 K에서 2000 K로 변화시키면서 계산을 수행하였다.

Fig. 3(a)에 원관 최대 표면온도가 2000 K으로 고정되었을 때 여러 다른 토치이송속도에 대한 원관 표면온도의 축방향 분포를 나타내었다. 실제 MCVD과정에서 토치근처의 원관표면의 최고온도를 일정하게 유지하므로 본 연구에서도 원관 최대 표면온도를 고정시켰다. 즉,  $q_{max}$ 를 변화시켜 가며 온도분포를 구하였으며 원하는  $T_{max}$ 를 나타내는

Table 1 Summary of calculation results

A.  $T_{\max}=2000$  K

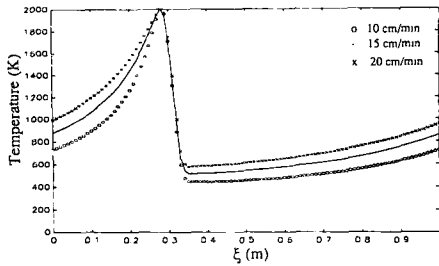
Flowrate ( $\ell$ /min)	Torch speed (cm/min)	Inner radius (mm)	Maximum heat flux ( $10^6\text{W}/\text{m}^2$ )	$T_{\min}$ (K)	$T_e$ (K)	Particle formation (%)	Tapered length (cm)	Spatial efficiency (%)
3	15	9	1.27788	519	606.5	100	24.5	47.5
2	15	9	1.28428	513	580.4	100	18	50
4	15	9	1.27372	525	628.4	62	25.5	43.2
3	10	9	0.90465	448	530.6	64	26	51.5
3	20	9	1.61918	581	675.3	100	21.5	42.9
3	15	9.5	1.14503	494	576.7	100	23.5	48
3	15	8.5	1.39796	542	632.4	100	22	45.3

B.  $T_{\max}=1900$  K

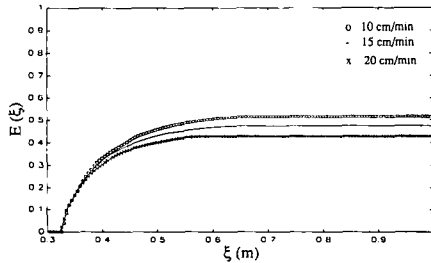
Flowrate (l/min)	Torch speed (cm/min)	Inner radius (mm)	Maximum heat flux ( $10^6\text{W}/\text{m}^2$ )	$T_{\min}$ (K)	$T_e$ (K)	Particle formation (%)	Tapered length (cm)	Spatial efficiency (%)
3	15	9	1.19272	515	600.8	66	24	47.4
2	15	9	1.19847	510	575.7	100	17.5	49.9
4	15	9	1.18898	520	672.7	40	19	39.8
3	10	9	0.84968	445	516.9	42	13.5	41.3
3	20	9	1.50428	575	667.5	100	21	42.9
3	15	9.5	1.07133	491	571.8	57	22.5	48
3	15	8.5	1.30187	537	626	80	21.5	45.2
3	5	9	0.55760	354	400	22	7	21.9

C.  $T_{\max}=1800$  K

Flowrate (l/min)	Torch speed (cm/min)	Inner radius (mm)	Maximum heat flux ( $10^6\text{W}/\text{m}^2$ )	$T_{\min}$ (K)	$T_e$ (K)	Particle formation (%)	Tapered length (cm)	Spatial efficiency (%)
3	15	9	1.10422	511	594.8	34	9.5	33.9
2	15	9	1.10936	506	570.5	77	17.5	49.9
4	15	9	1.10082	516	614.7	21	6	20.8
3	10	9	0.79104	442	513	23	5	22.1
3	20	9	1.38638	570	659.1	50	24	44.5
3	15	9.5	0.99406	487	566.6	30	7.5	29.4
3	15	8.	1.20249	533	619.1	37	11	36.8



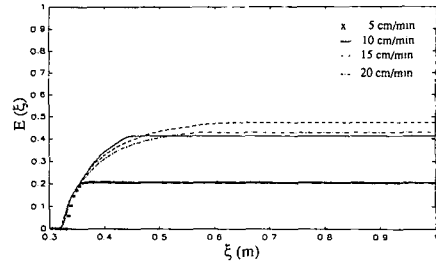
(a)



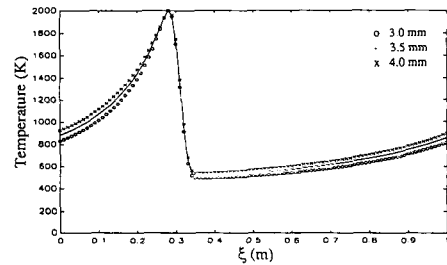
(b)

**Fig. 3** (a) Axial distribution of wall temperature for various torch speeds ( $R_i=9$  mm,  $R_o=12.5$  mm,  $L=1$  m,  $\xi_{\text{torch}}=30$  cm,  $Q=31$ /min,  $T_{\text{max}}=2000$  K,  $T_{\infty}=300$  K)  
 (b) Spatial efficiency of deposition for various torch speeds ( $R_i=9$  mm,  $R_o=12.5$  mm,  $L=1$  m,  $\xi_{\text{torch}}=30$  cm,  $Q=31$ /min,  $T_{\text{max}}=2000$  K,  $T_{\infty}=300$  K)

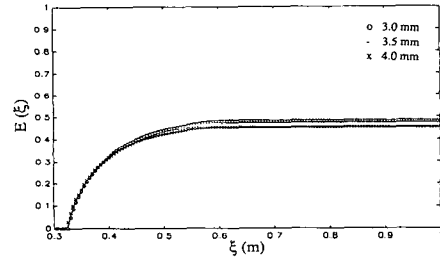
$q_{\text{max}}$ 를 찾았다. 다른 공정조건에서는 같은  $T_{\text{max}}$ 를 나타내는  $q_{\text{max}}$ 가 달라지게 되며 이를 Table 1에 나타내었다. 낮은 토치이송속도인 경우 높은 이송속도의 경우보다 온도구배가 크고 토치전방의 최소온도가 낮음을 알 수 있다. 낮은 토치 이송속도인 경우 현재와 전번 토치이송 사이의 시간 간격이 크므로 원관이 오랜 시간동안 냉각되어 높은 토치이송속도의 경우보다 낮은 원관의 온도를 나타내게 된다. 입자의 형성이 충분하여서 입자증착효율이 입자의 이동에 의존하는 경우에는 Walker 등<sup>(3)</sup>이 제안한 대로 원관의 최소온도가 총 효율에 큰 영향을 미치며 Fig. 3(b)에서 볼 수 있듯이 최소온도가 가장 낮은 10 cm/min의 토치이송속도의 경우가 가장 높은 총효율을 나타내고 있다. 그러나 입자의 형성이 충분치 않은 경우 즉, 불충분한 토치가열로 인하여 원관의 표면 근처에서만 화학반응온도를 넘게 되는 경우에는 입자의 증착효율은 입자의 형성효율에 의존하게 된다.<sup>(3)</sup> Fig. 4에 원관의 최대 표면온도를 1900 K로 고정시킨 경우의 증착효율을 나타



**Fig. 4** Spatial efficiency of deposition for various torch speeds ( $R_i=9$  mm,  $R_o=12.5$  mm,  $L=1$  m,  $\xi_{\text{torch}}=30$  cm,  $Q=31$ /min,  $T_{\text{max}}=1900$  K,  $T_{\infty}=300$  K)



(a)



(b)

**Fig. 5** (a) Axial distribution of wall temperature for various solid layer thicknesses ( $R_o=12.5$  mm,  $L=1$  m,  $\xi_{\text{torch}}=30$  cm,  $V_{\text{torch}}=15$  cm,  $Q=31$ /min,  $T_{\text{max}}=2000$  K,  $T_{\infty}=300$  K)  
 (b) Spatial efficiency of deposition for various solid layer thicknesses ( $R_o=12.5$  mm,  $L=1$  m,  $\xi_{\text{torch}}=30$  cm,  $V_{\text{torch}}=15$  cm,  $Q=31$ /min,  $T_{\text{max}}=2000$  K,  $T_{\infty}=300$  K)

내었다. 15 cm/min과 20 cm/min의 토치속도의 경우에는 입자의 형성이 충분(62%와 100%)하여서 총 효율이  $T_e$ 에 의존하나 각각 5 cm/min과 10 cm/min의 낮은 토치이송속도의 경우 입자형성이 낮으며 이 경우 총 효율은 입자의 형성효율과 비슷한 값을 갖게 된다. 실제 공정에서 중요한 인자중의 하나인 축방향 불균일 부착길이(tapered entry

length)는 Table 1에 나타낸 바와 같이 낮은 토치 이송속도인 경우에 짧으므로 토치이송의 초기 단계에는 총효율의 감소를 감수하며 낮은 토치 이송속도를 사용하여 축방향 불균일 부착길이를 줄일 수 있다.

입자가 부착되면서 고체층의 두께는 증가하며 이러한 두께의 증가가 열전달과 입자부착에 영향을 미치게 된다. Fig. 5(a)에 여러 다른 두께의 고체층의 경우에 대하여 원관 표면온도분포를 나타내었다. 두께가 두꺼울 경우 원관의 최소온도가 높으며 이는 Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이 낮은 총효율의 원인이 된다. 두께가 3 mm에서 4 mm로 되었을 때 총 효율은 3%가량 떨어지게 된다.

유량을 증가시켰을 때 즉, 2l/min, 3l/min 그리고 4l/min인 경우 원관의 온도분포는 거의 같은 분포를 보이지만 증착효율은 큰 차이를 보인다. Fig. 6에 세가지 다른 유량에 대한 증착효율을 나타내었으며 유량이 증가할 수록 낮은 증착효율을 보이고 있다. 이는 유량이 증가할 수록 많은 입자가 원관 밖으로 유출된다는 사실에 기인하고 있다. 증착물은 단위시간당의 증착 질량으로 증착효율과

유량의 곱에 비례하기 때문에 낮은 총 효율이 낮은 증착물을 의미하는 것은 아니다. Fig. 7에 증착물을 나타내었으며 그림의 종축변수에 나타낸 F는 liter부피의 SiCl<sub>4</sub>로부터 형성될 수 있는 SiO<sub>2</sub>의 질량을 나타내는 환산 인자로 단위는 g/l이다. 최대의 증착물을 나타내는 유량이 존재함을 보여주고 있다. T<sub>max</sub>=1900 K일 경우 4l/min 그리고 T<sub>max</sub>=1800 K일 때 2l/min이 최대 증착물을 나타낸다.

### 4. 결 론

수정된 화학증착(MCVD)과정에서 토치이송속도와 고체층이 증착효율, 증착물 그리고 축방향 불균일 부착길이에 미치는 영향을 파악하기 위한 수치 해석적 연구를 수행하였다. 두개의 토치를 사용하며 열유속 경계조건을 사용하는 새로운 모델을 사용하였으며 반복되는 토치이송으로 인한 가열효과가 포함되었다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 계산을 수행하여 얻은 원관의 온도분포와 총 효율을 기존의 실험결과와 비교하였는데 잘 일치함을 알았으며 토치전방에 발생하고 있는 원관의 최소온도를 잘 예측하고 있다. 따라서 본 연구에서 제안하고 있는 두개의 토치를 사용한 모델이 반복 이송되는 토치의 가열효과를 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

(2) 원관의 최대온도를 2000 K로 고정하였을 경우 토치이송속도가 감소할 수록 총 효율이 증가하나 원관의 최대온도를 1900 K으로 고정하였을 경우에는 토치이송속도가 낮을 때 입자의 형성이 불충분하여서 토치이송속도를 10 cm/min에서 5 cm/min으로 낮추었을때 총 효율이 감소한다.

(3) 고체층의 두께가 증가할 때 총 효율은 약간 감소한다. 즉 두께가 3 mm에서 4 mm로 증가하였을 때 증착효율이 약 3% 감소한다.

(4) 최대 증착물을 나타내는 유량이 존재한다. 예를 들면 T<sub>max</sub>=1900 K, V<sub>torch</sub>=15 cm/min에서 4 l/min의 유량이 최대 증착물을 나타낸다.

### 후 기

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

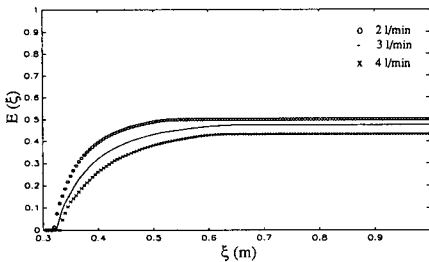


Fig. 6 Spatial efficiency of deposition for various flowrates (R<sub>i</sub> = 9 mm, R<sub>o</sub> = 12.5 mm, L = 1 m, ξ<sub>torch</sub> = 30 cm, V<sub>torch</sub> = 15 cm, T<sub>max</sub> = 2000 K, T<sub>∞</sub> = 300 K)

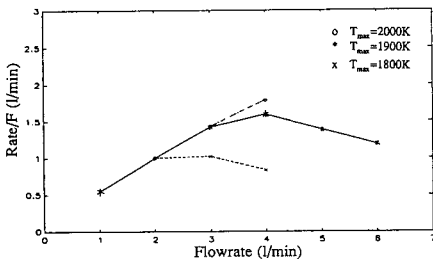


Fig. 7 Deposition rate for different flowrates (R<sub>i</sub> = 9 mm, R<sub>o</sub> = 12.5 mm, L = 1 m, ξ<sub>torch</sub> = 30 cm, V<sub>torch</sub> = 15 cm, T<sub>∞</sub> = 300 K)



## 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. 10 th Proc Int. Congr. Glass. 10 th*, Kyoto, Japan, pp. 6-40~6-44.
- (2) MacChesney, J. B., O'Connor, P. B. and Presby, H. M., 1974, "A New Technique Preparation of Low-Loss and Graded Index Optical Fibres," *Proc. IEEE*, 62, pp. 1278~1279.
- (3) 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, 552~558.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Kim, K. S. and Pratsinis, S. E., 1990, "Codeposition of SiO<sub>2</sub>/GeO<sub>2</sub> during Production of Optical Fiber Preforms by Modified Chemical Vapor Deposition," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 9, pp. 1977~1986.
- (7) 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.
- (8) Lin, Y. T., Choi, M. and Greif, R., 1991, "A Three Dimensional Analysis of the Flow and Heat Transfer for the MCVD Process Including Buoyancy, Variable Properties and Tube Rotation," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol 113, pp. 400~406.
- (9) Lin, Y. T., Choi, M. and Greif, R., 1991, "A Three Dimensional Analysis of Particle Deposition for the Modified chemical Vapor Deposition(MCVD) Process," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol 114, pp. 735~742.
- (10) 박경순, 1993, "Modified Chemical Vapor Deposition 공정에서 토치 이송속도와 원관두께가 입자의 부착에 미치는 영향," 서울대학교 공학석사학위논문, 기계공학과.
- (11) Weast, R. C. and Astle, M. J., 1981, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press Inc., 61st Ed.
- (12) Irvine, T. F. and Liley, Jr. P. E., 1984, *Stream and Gas Tables with Computer Equations*, Academic Press, pp. 161~165.
- (13) 조재결, 1994, "수정된 화학증착과정에서 증착성능에 관한 실험적 연구," 공학석사학위논문, 서울대학교 기계공학과.
- (14) 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.
- (15) Gardon, R., 1961, "A Review of Radiant Heat Transfer in Glass," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 44, No. 7, pp. 305~313.
- (16) 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.
- (17) 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.
- (18) Siegel, R. and Howell, J. R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3rd Edition, Hemisphere Publishing Corporation.
- (19) Simpkins, P. G., Greenberg-Kosinski, S. and MacChesney, J. B., 1979, "Thermophoresis: The Mass Transfer Mechanism in Modified Chemical Vapor Deposition," *J. of Applied Physics*, Vol. 50, No. 9, pp 5676~5681.
- (20) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat and Fluid Flows*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.