

〈論 文〉

수정된 화학증착(MCVD)에 관한 실험적 연구 — 온도분포와 입자부착 측정

조재걸* · 최만수**

(1994년 6월 13일 접수)

An Experimental Study of the Modified Chemical Vapor Deposition Process — Temperature Distribution and Particle Deposition Measurements —

Jaegeol Cho and Mansoo Choi

Key Words : Optical Fiber(광섬유), Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD : 수정된 화학증착), Thermophoresis(열영동)

Abstract

An experimental study has been made for heat transfer and particle deposition during the Modified Chemical Vapor Deposition process which is currently utilized to manufacture high quality optical waveguides. The distributions of tube wall temperatures, rates and efficiencies of particle deposition were measured. Results indicate that the temperature distributions of the tube wall in the axial direction yield the quasi-steady form in which temperature distributions fit in one curve if the relative distance from the moving torch is used as an axial coordinate. Due to the repeated heatings from the traversing torch, the wall temperatures are shown to reach the minimum ahead of torch and it is shown that the two torch formulation suggested by Park and Choi is valid to predict this minimum temperature. Measured wall temperatures, particle deposition efficiencies and tapered entry length are compared with the previous modelling results and shown to be in agreement.

기 호 설 명

E : 증착효율
 K : 열영동계수 (thermophoretic coefficient)
 M_{SiCl_4} : $SiCl_4$ 의 분자량
 M_{SiO_2} : SiO_2 의 분자량
 T : 온도
 T_{max} : 최고온도
 T_{min} : 최소온도
 T_{rxn} : 반응온도 (reaction temperature)

V_T : 열영동속도 (thermophoretic velocity)
 V_{torch} : 토치이송속도
 x : 토치이송 시작점으로부터의 축방향 절대좌표
 그리스문자
 ν : 동점성계수

1. 서 론

MCVD(modified chemical vapor deposition) 방법⁽¹⁾은 현재 널리 사용되는 광섬유 제조공정이며 그 과정은 다음과 같다. 먼저 불꽃세척 (fire polis-

*정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 서울대학교 기계공학과

hed)된 실리카 원관을 선반에 설치한 다음 회전시키면서 느린 속도로 이동되는 산소-수소 토치로 가열한다. 이 때 SiCl_4 , GeCl_4 , O_2 등의 화학반응 기체들이 원관 내부로 유입되며 이 반응기체들은 토치근방에 이르러 화학반응온도에 도달하여 화학반응을 일으켜 SiO_2 , GeO_2 등과 같은 미세한 입자를 형성한다. 이 입자들은 기체와 함께 이동되다가 열영동(thermophoresis) 즉, 온도구배가 존재하는 기체장에 있는 입자가 온도가 감소되는 방향으로 받는 힘(Simpkins 등⁽²⁾)에 의해 원관 내벽에 부착되며 부착된 입자들은 이동되는 토치의 가열에 의해 소결되어 얇은 유리질막을 형성한다. 토치가 원관의 끝부분에 도달하게 되면 한 층의 증착이 이루어지게 되며 이 같은 과정이 반복되어 10~40 층의 증착이 이루어지면 원관을 수축(collapsing)시켜 원봉형태의 광섬유 모재(preform)를 만든 후 이를 가늘게 인발(drawing), 코팅(coating)하여 광섬유를 완성한다.

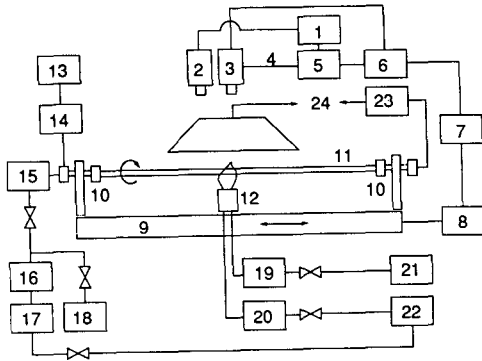
MCVD 공정에 대한 기존의 연구는 모델링에 의한 이론적 연구가 대부분이며 실험결과는 Walker 등⁽³⁾ 이외에는 거의 발표되지 않았다. 이에 본 연구에서는 원관의 온도분포 및 입자부착의 측정을 위한 실험을 수행하여 실험자료를 확립하여 그 실험적 결과들을 기존의 모델링에 의한 결과와 비교, 모델링의 타당성을 검증하고자 한다. Walker 등⁽³⁾은 열영동으로 인한 입자의 이동 및 부착에 대하여 실험적, 수치적 연구를 수행하였으며 Wang 등,⁽⁴⁾ DiGiovanni 등,⁽⁵⁾ 그리고 Morse 등⁽⁶⁾은 laser-enhanced MCVD 방법을 연구하였다. Kim과 Pratsinis^(7,8)는 화학반응과 실리카 에어로졸의 거동에 대한 수치해석 및 화학반응을 고려한 SiO_2 , GeO_2 의 부착을 연구하였다. Choi 등⁽⁹⁾은 완전발달된 속도분포를 가정하여 원관의 회전과 토치에 의한 국소적인 가열의 영향을 연구하였으며 물성치의 변화와 원관의 회전, 부력의 영향을 포함한 3차원적 연구가 perturbation 해석(Choi 등⁽¹⁰⁾)과 수치해석(Lin 등^(11,12))을 통해 이루어졌다. 복사효과가 입자부착에 미치는 영향이 Jia 등,⁽¹³⁾ Park과 Kim⁽¹⁴⁾에 의해 연구되었으며 Joh 등⁽¹⁵⁾은 원관내의 완전발달유동에 대해 화학반응의 영향을 연구하였다. Park과 Choi⁽¹⁶⁾는 증착된 고체층 두께의 영향 및 MCVD과정에서 일어나는 주기적인 가열의 영향을 연구하기 위하여 열유속 경계조건을 사용하는 두개의 토치를 이용한 모델(two torch system)을 제안

하였다.

위와 같은 모델링을 검증하기 위해서는 다양한 조건 즉, 유량의 변화와 토치속도의 변화 등에 따른 원관의 온도분포, 입자부착효율 및 증착률 등의 실험 결과가 필요하며 본 연구의 목적은 MCVD공정중에 발생하는 열전달 및 입자부착에 대한 실험적 자료를 확립하며 실험적 결과를 기존의 모델링을 사용한 결과와 비교, 검토하는 것이다.

2. 실험장치와 방법

MCVD증착과정에 대한 실험을 수행하기 위하여 실제와 유사한 실험장치를 구성, 제작하였으며 전체 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 토치이송을 위한 1축 이송장치를 제작하였으며 구동 모터로 stepping motor를 사용하여 PC에서 펄스(pulse)를 제어하여 반복이송되는 토치의 속도를 조절하였다. 토치는 증착시 약 10~30 cm/min 범위내의 일정한 속도로 이송되며 한 층의 증착이 끝난 후 초기 위치로 돌아올 때의 속도는 약 300 cm/min으로 설계하였다. 높은 온도로 녹는 점 가까이 가열되는 석영관과 회전시 변형을 방지하려면 원관의 양단을 동시에 회전시켜야 하며, 이를 위하여 원관을 지지하는 chuck과 타이밍기어 및 벨트로 연결된 별도의 장치를 설계, 제작하여 사용하였다. 원관회전을 위한 구동모터로는 속도변화가 가능한 AC motor를 사용하였으며 30~120 rpm으로 원관을 회전시키도록 설계하였다. 원관과 chuck 사이의 밀봉을 위하여 원관의 chuck은 O-ring이 압축되어 원관을 지지, 회전시키도록 설계, 제작하였다. Bubbler에 담긴 SiCl_4 액체속으로 연결된 유리관으로 유입된 O_2 가 SiCl_4 를 증발시켜 혼합기체를 형성하게 되며 이 혼합기체는 rotary connector를 거쳐 회전하는 silica 원관 내부로 공급된다. Carrier gas의 유량은 rotameter(OMEGA, FL-122)로 조절하였으며 이 rotameter는 O_2 를 측정기체로 하여 wet test gasmeter로 보정하였다. 토치의 연료로 쓰이는 H_2 와 O_2 는 각각 pressure regulator, rotameter(OMEGA, FL-1501A, FL-1502A)를 거쳐 토치에 연결되며 rotameter는 공기를 측정기체로 하여 유량을 보정한 후 이를 각각 H_2 와 O_2 의 유량으로 변환하여 사용하였다. 토치는 상단부에 7개의 화염 분사구가 있는 tip 6개가 반원형으로 배열된 형상(6-fire, 7-jet 형)으로 그 개략도를 Fig. 2에 나타



1. A/D converter
2. Pyrometer for high temperature
3. Pyrometer for low temperature
4. RS-232C
5. IBM PC
6. Digital I/O card
7. Stepping motor driver
8. Stepping motor
9. 1-dimensional traverse system
10. Tube chuck
11. Quartz tube
12. Oxy-hydrogen torch
13. AC motor speed controller
14. AC motor
15. Rotary connector
16. Bubbler
17. Rotameter for carrier gas
18. Nitrogen
19. Rotameter for hydrogen
20. Rotameter for oxygen
21. Hydrogen
22. Oxygen
23. Scrubber
24. Exhaust

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

내었다. 토치에 의해 가열되는 원관외벽의 온도를 측정하기 위하여 2개의 적외선온도계(Infrared Thermometer)를 사용하였다. 1,000°C 이상의 온도범위는 고온용 적외선온도계(IRCON, Series 7000-799C10)로 측정하고, 그 이하의 온도범위는 저온용 적외선온도계(MINOLTA, FA-0510)로 측정하였으며 두 적외선온도계로 측정된 온도를 열전대로 측정된 온도와 비교하였다. 원관내부에서 SiCl₄와 O₂가 반응하고 난 후 배기되는 Cl₂ gas를 흡수, 중화시키도록 하기 위하여 scrubber를 아크릴통을 이용하여 제작하였으며 NaOH수용액을

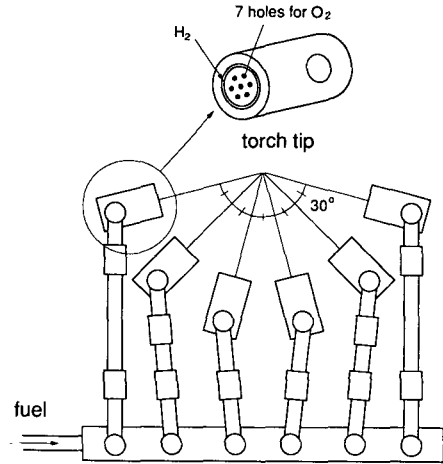
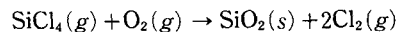


Fig. 2 Schematic of oxy-hydrogen torch

압축공기를 사용하는 spray gun으로 분무하여 중화시킨다.

본 실험에서는 내경 17 mm, 외경 20 mm, 길이 1m의 석영관을 사용하였으며, 이 원관을 60 rpm으로 회전시키면서 액체 SiCl₄가 담긴 bubbler에 O₂를 통과시켜 SiCl₄와 O₂의 혼합기체를 원관내부로 주입하였다. 실험중 bubbler의 온도는 약 19~20°C로 유지되었으며, O₂의 유량은 1~3 l/min 범위내에서 조절하였다. 토치는 15~25 cm/min 범위내의 일정한 속도로 이동하다가 이동시작점으로부터 750 mm가 되는 지점에서 약 300 cm/min의 속도로 되돌아와서 다시 느린 속도로 반복이동을 시작하며, 토치가 초기 위치로 돌아올 때는 토치와 bubbler로 들어가는 O₂를 차단하였다.

증착과정중 다음과 같은 화학반응이 발생하여



SiO₂입자가 형성된다. SiO₂입자는 열영동력(thermophoretic force)에 의해 토치전방의 원관내벽에 부착되며 이 때 열영동속도는 다음과 같이 표현된다.

$$V_T = -\frac{K\nu}{T} \nabla T$$

여기서, K 는 열영동계수이며 ν 는 동점성계수이다. 그러므로 증착과정에서 원관내부의 기체 온도의 조절이 중요하며 이 온도장은 결국 토치에 의해 가열되는 원관외벽의 축방향 온도분포에 의해 결정된다. 이미 언급한 바와 같이 본 실험에서는 2

개의 적외선온도계를 사용하여 1000°C 이상의 고온 영역과 1000°C 이하의 저온 영역을 나누어 외벽온도를 측정하였다. 고온용 온도계(spectral response 4.8~5.2 μm)는 초점거리 330 mm(target diameter ϕ 3.3 mm)에서 측정하였으며 저온용 온도계(spectral response 8~13 μm)는 초점거리 500 mm(target diameter ϕ 9 mm)에서 측정하였다. 산소-아세틸렌 토치로 원관의 표면을 녹여 W형 열전대(OMEGA, W5% Re - W26% Re, diameter 0.005 inch)를 설치한 후 회전하지 않는 원관의 표면온도를 토치가열시 측정하여 적외선온도계를 사용하여 측정된 결과와 비교하였다. 고온용 온도계와 저온용 온도계의 방사율을 각각 0.98, 0.9로 설정한 경우 비교적 작은 차이를 보였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 이렇게 설정된 방사율을 60 rpm으로 회전하는 경우에도 사용하였으며, 원관의 벽의 온도는 축방향으로만 변화하고 원주방향으로의 변화는 없다고 가정하였다. 30 rpm 이상의 회전속도에서는 원주방향으로 거의 균일한 온도분포를 가진다는 Lin 등⁽¹⁷⁾의 결과는 60 rpm의 회전속도에서 위의 가정이 타당함을 보여 주고 있다.

원관내부로 흘러들어가는 SiCl_4 의 양은 bubbler로 유입되는 carrier gas O_2 의 유량으로 조절하였으며, 이때 SiCl_4 의 질량유량은 electronic balance(OHAUS, GT-4100, accuracy=0.01 g)를 사용하여 일정시간 동안의 bubbler의 무게변화를 측정하여 구한다. 측정된 SiCl_4 의 질량으로부터 최대 형성될 수 있는 SiO_2 의 질량을 계산할 수 있으며 실제로 증착된 양과 비교하여 증착효율을 구한다. SiO_2 의 증착률은 증착전후의 원관의 무게 변화와 증착시간으로부터 구할 수 있다. 증착효율과 증착률

을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{증착률} &= \text{증착된 } \text{SiO}_2 \text{의 질량} / \text{증착시에 소요된 시간} \\ &= \text{원관의 무게 변화} / (\text{토치이송거리} / \text{토치속도}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{증착효율} &= \text{증착된 } \text{SiO}_2 \text{의 질량} / \text{최대 생성가능한 } \text{SiO}_2 \\ &\quad \text{의 질량} \\ &= (\text{원관의 무게 변화} / M_{\text{SiO}_2}) / (\text{bubbler의 무게 변화} / M_{\text{SiCl}_4}) \end{aligned}$$

여기서, M_{SiO_2} 는 SiO_2 의 분자량이며 M_{SiCl_4} 는 SiCl_4 의 분자량이다.

본 실험에서 측정된 원관의 벽의 온도분포, 증착률, 증착효율의 불확실성(uncertainty)을 추정하기 위하여 Benedict⁽¹⁸⁾의 방법에 의하여 불확실성 해석을 수행하였으며 주어진 조건 ($V_{\text{torch}}=20 \text{ cm/min}$, O_2 와 SiCl_4 의 유량=2 l/min, 3 pass 증착)에서 증착된 SiO_2 의 질량과 SiCl_4 질량유량의 상대적 불확실도(relative uncertainty)는 각각 $\pm 5\%$ 와 $\pm 9.7\%$ 로 추정되었다. 증착률과 증착효율의 상대적 불확실도는 각각 $\pm 5\%$ 와 $\pm 6.5\%$ 였으며 온도의 상대적 불확실도는 $\pm 5.4\%$ 로 나타났다.

3. 결과 및 토의

기존의 많은 연구^(9, 10, 12, 17 등)에서 MCVD 공정 해석은 준정상상태(quasi-steady) 가정에 근거하고 있다. 준정상상태 모델링은 축방향 온도분포가 토치와 함께 이동하는 이동좌표계에서는 정상상태의 분포, 즉, 토치와의 상대거리에 의해서만 결정되는 온도분포를 가진다고 가정한 것으로, 이러한 가정은 해석을 매우 단순화시켰으며 본 연구에서는 그 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. 먼저 토치가 이송될 때 축방향으로 서로 다른 지점들의 시간에 따른 온도변화를 측정하였다. Fig. 4(a)는 축방향으로 서로 다른 5개의 측정 지점의 온도변화를 시간에 따라 즉, 그 동안 토치가 이동한 거리에 따라 나타낸 것이다. 예를 들어, 그림에서 원으로 표시된 온도는 토치이송 시작점으로부터 축방향으로 $x=75 \text{ mm}$ 떨어진 지점의 온도를 나타낸다. 토치가 측정지점($x=75 \text{ mm}$)에 가까이 접근함에 따라 온도가 급격히 증가하였다가 토치가 지나간 후에는 천천히 감소함을 알 수 있으며 다른 지점의 온도도 마찬가지로의 경향을 보이고 있다. 위에서 측정된 온도를 이동좌표계에서의 위치 즉 토치로부터의 상대거리에 따라 Fig. 4(b)에 표시

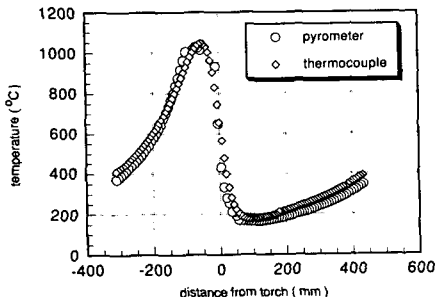


Fig. 3 Axial temperature distributions. (emissivity = 0.98 beyond 1000°C and 0.9 below 1000°C, 2 pass)

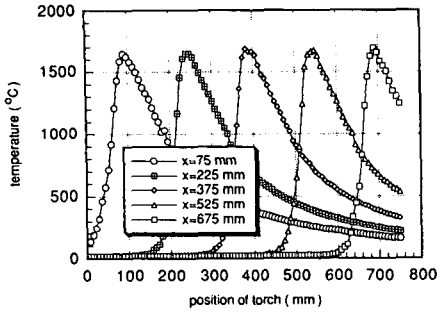


Fig. 4 (a) Transient temperature variations for different axial locations ($V_{\text{torch}}=20$ cm/min, no carrier gas, 1 pass)

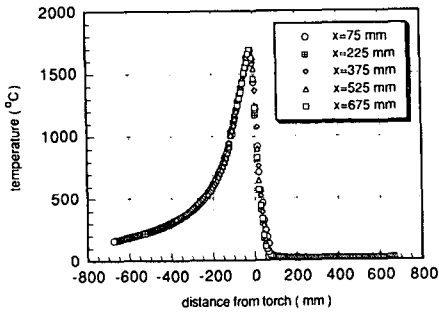


Fig. 4 (b) Temperature variations for different axial locations in moving coordinate. ($V_{\text{torch}}=20$ cm/min, no carrier gas, 1 pass)

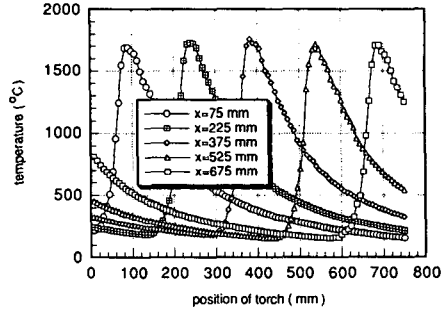


Fig. 5 (a) Transient temperature variations for different axial locations. ($V_{\text{torch}}=20$ cm/min, no carrier gas, 2 pass)

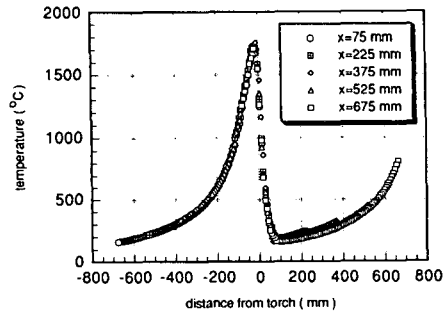


Fig. 5 (b) Temperature variations for different axial locations in moving coordinate. ($V_{\text{torch}}=20$ cm/min, no carrier gas, 2 pass)

하였다. 그림에서 볼수 있는 바와 같이 여러 지점의 온도분포가 토치를 기준으로 한 이동좌표계에서는 하나의 곡선으로 표시됨을 알 수 있다. 이 같은 사실은 원관외벽의 온도분포가 결국 토치와의 상대 거리에 따라 결정된다는 것을 의미하며 기존의 준정상상태 모델링의 타당성을 입증해주는 것이다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 두번째 토치이송시의 온도분포를 나타낸 것으로 첫번째와 마찬가지로 이동좌표계에서는 정상상태로 취급할 수 있음을 보여 주고 있다. 특히, Fig. 5(b)에서는 토치전방에 최소온도가 존재함을 알 수 있는데 이러한 현상은 이전 토치이송시의 가열효과로 인한 것으로 Walker 등⁽³⁾에 의해 실험적으로 보고되었으며 Park과 Choi⁽¹⁶⁾에 의해 수치적으로 예측되었다. Walker 등⁽³⁾은 입자의 부착효과와 토치전방의 최소온도와의 상관관계식을 제안하였으며 Park과 Choi⁽¹⁶⁾는 준정상상태에서 두개의 토치가 원관길이만큼 거리를 두고 같은 속도로 움직이는 모델을 제시하여 토치 전방의 최소온도를 예측할 수 있었다. 이 때 두개의 토

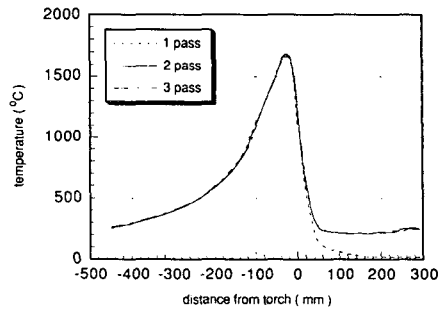


Fig. 6 Typical tube wall temperature profiles for different passes. ($V_{\text{torch}}=20$ cm/min, carrier gas $O_2=2$ l/min, Fuels: $H_2=51$ l/min, $O_2=29$ l/min)

치는 각각 현재와 그 이전 pass에 의한 연속적인 가열의 영향을 나타내는 것으로 이러한 모델링에 의한 계산결과를 본 실험결과와 비교하였으며 Fig. 9와 Fig. 10에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 6에 실제 증착시 1, 2, 3 pass에서의 온도분포를 나타내었다. 2 pass이상의 경우는 1 pass와

달리 토치전방에서 최저온도가 존재함을 확인할 수 있었다. 2 pass와 3 pass의 온도차이가 거의 없었으므로 2 pass이상에서 원관은 토치이동좌표계에서 같은 온도분포를 가진다고 볼 수 있으며 따라서 두 개의 연속적인 pass만을 고려한 Park과 Choi⁽¹⁶⁾의 two torch 모델링이 타당함을 검증할 수 있었다.

Fig. 7은 2 pass에서 유량이 0 l/min일 경우와 O₂만 2 l/min 흘러 보낼때의 온도를 비교한 것으로 두 경우의 온도분포가 거의 일치함을 알 수 있으며 유량이 원관의 벽면온도에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었으나 화학반응이 일어나는 경우 즉, SiCl₄와 O₂를 함께 흘러 보낼때는 화학반응의 영향으로 인해 원관의 온도는 유량에 따라 변화하였다. Fig. 8은 SiCl₄와 O₂를 함께 흘러 보낼때의 유량에 따른 온도분포를 비교한 것으로 유량이 증가할수록 온도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 SiCl₄와 O₂가 토치근방을 지나면서 화학반응이 일어나며 발열반응이 발생하여 원관의 온도를 증가시킨 것으로 보인다. Joh와 Greif⁽¹⁹⁾도 화학반응으로 인해 원관내의 기체의 온도가 상승한다는 결과를 수치적으로 얻은 바 있다. 또한 Fig. 8에서 토치전방의 최소온도도 유량에 따라 증가함을 알 수 있다. Walker 등⁽³⁾의 증착효율 관계식($E \approx 0.8(1 - T_{min}/T_{rxn})$)으로부터 토치전방의 최소온도가 증가할때 증착효율이 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 9에 Park과 Choi⁽¹⁶⁾의 two torch 모델링에 의한 계산 결과를 본 실험결과와 비교하였으며 계산결과는 carrier gas O₂만이 존재하는 경우에 대한 것이다. 두 결과가 비교적 잘 일치하였으며 SiCl₄가 있는 경우는 화학반응의 영향으로 인하여

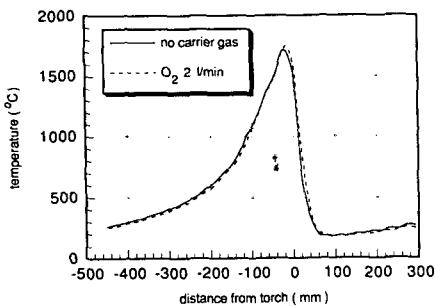


Fig. 7 Axial wall temperature distributions with and without O₂. ($V_{torch} = 20$ cm/min, Fuels: H₂ = 51 l/min, O₂ = 29 l/min)

약간 온도가 상승함을 알 수 있다. Fig. 10은 축방향으로 입자 부착 분포를 비교한 것으로 실선은 위의 모델링에 의해 예측된 원관의 축방향 증착효율

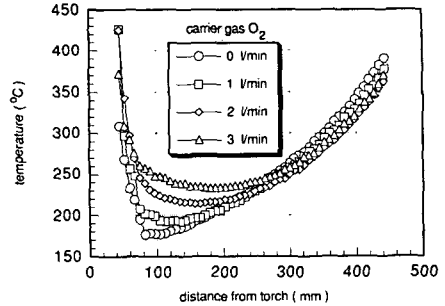


Fig. 8 Effects of carrier gas flow rates on tube wall temperatures ahead of the torch. ($V_{torch} = 20$ cm/min, Fuels: H₂ = 51 l/min, O₂ = 29 l/min, 2 pass)

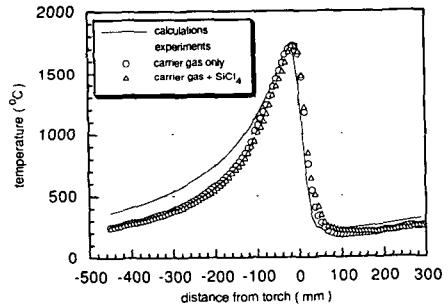


Fig. 9 Comparison of tube wall temperature measurements with numerical calculations based on Park and Choi (1994). ($T_{max} = 1720^\circ\text{C}$, $V_{torch} = 20$ cm/min, carrier gas O₂ = 2 l/min)

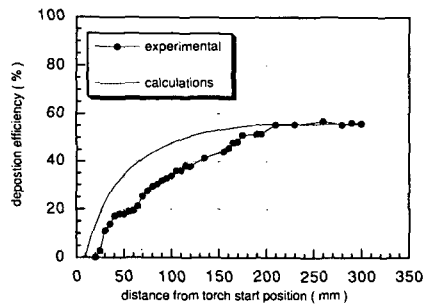


Fig. 10 Comparison of deposition efficiency with numerical calculations based on Park and Choi (1994). ($T_{max} = 1720^\circ\text{C}$, $V_{torch} = 20$ cm/min, carrier gas O₂ = 2 l/min)

을 나타낸 것이다. 원으로 표시된 것은 광학현미경 사진으로 측정된 축방향에 따른 증착두께의 분포를 무차원화하여 나타낸 값이다. 본 실험에서는 증착된 원관을 축방향에 따라 절단한 후 그 단면을 광학 현미경으로 관찰하였다. 증착된 층은 백색의 다공성 형태로서 증착 두께의 측정이 가능하였으며 축방향에 따라 이를 적분하여 일정한 높이로 증착되었다고 할때 등가면적을 갖는 기준 두께를 계산하였다. 이 두께가 전체 증착효율과 비례하므로 축방향으로 변화하는 측정 두께를 기준 두께로 무차원화하여 전체 증착효율을 곱한 값이 측정된 축방향 증착효율이 된다. 그림에서 증착효율이 불균일한 구간이 존재하는 것을 볼 수 있으며 이를 "경사부착구간"(tapered entry)이라 한다. 토치 이동시 작점 근처에서는 end effect으로 인해 준정상상태에서의 계산결과와 차이를 보였으나 불균일 증착길이는 약 20 cm정도로 일치하였으며 그 이후의 축방향위치에 따른 증착효율도 거의 일치하였다.

Fig. 11은 최고온도를 일정하게 유지시킬때 두번째 토치이송시 토치속도가 원관외벽의 온도분포에

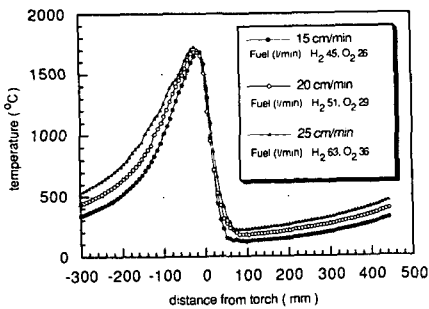


Fig. 11 Effects of torch speeds on tube wall temperature distributions. (no carrier gas, 2 pass)

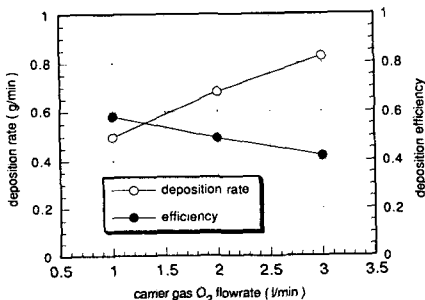


Fig. 12 Deposition rate and efficiency for various flow rates. ($V_{torch}=20$ cm/min, Fuels: $H_2=51$ l/min, $O_2=29$ l/min)

미치는 영향을 나타낸 것이다. 토치속도가 낮을수록 주위의 공기에 의해 냉각되는 시간이 늘어나므로 높은 토치속도의 경우에 비해 급격한 온도구배와 낮은 최저온도를 가짐을 알 수 있으며 이것은 Park과 Choi⁽¹⁶⁾의 결과와 일치하는 것이다.

Fig. 12은 유량에 따른 증착률과 증착효율을 나타낸 것으로 유량이 증가함에 따라 증착률은 증가하였으나 증착효율은 감소하였다. Carrier gas(O_2)의 유량이 증가할수록 bubbler에서 더 많은 양의 $SiCl_4$ 가 증발하므로 증착률은 증가하나 기체의 속도가 빨라지면 화학반응은 원관내벽 근처로 제한되며 생성된 입자들이 증착되지 않고 원관 밖으로 배출되기 쉬우므로 증착효율은 감소하는 것이다. 또한 Fig. 8에서 설명한 바와 같이 유량이 증가할때, 토치 전방에 존재하는 원관의 최소온도가 증가하는 사실도 증착효율을 감소시키는데 기여할 것으로 판단된다. 이와 같이 증착률과 증착효율이 반대의 경향을 보이는 것은 전체 공정의 생산단가를 고려할 때 최소단가를 갖는 최적유량이 존재한다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 MCVD 공정에서 발생하는 열전달 및 입자의 부착에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 원관외벽의 온도분포, 증착률, 증착효율등을 측정하였으며 기존의 수치해석결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 준정상상태 모델링(quasi-steady state modeling)의 타당성을 실험적으로 검증하였다.
- (2) 두번째 토치pass 이후의 벽면 온도분포는 거의 변하지 않았으며 두 개의 pass만을 모델링한 Park과 Choi⁽¹⁶⁾의 two torch 모델링이 타당함을 확인하였다.
- (3) 원관의 반복적인 가열로 인해 토치전방에서 최저온도가 존재함을 실험적으로 확인하였다.
- (4) 원관외벽의 온도분포와 입자부착 profile이 기존의 모델링에 의한 결과와 거의 일치함을 보였다.
- (5) $SiCl_4$ 와 O_2 혼합기체의 유량이 증가할수록 화학반응의 영향으로 인하여 토치전방에 존재하는 최저온도는 증가하였다.
- (6) 유량이 증가할수록 증착률은 증가하였으나 증착효율은 감소하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호 : 921-0900-004-2)에 의하여 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Simpkins, P. G. Kosinski, S. G., and MacChesney, J. B., 1979, "Thermophoresis: The Mass Transfer Mechanism in Modified Chemical Vapor Deposition," *J. of Applied Physics*, 50, pp. 5676~5681.
- (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. of American Ceramic Society*, Vol. 63, pp. 552~558.
- (4) Wang, C. Y., Morse, T. F. and Cipolla, Jr. J. W., 1985, "Laser Induced Natural Convection and Thermophoresis," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol.107, pp. 161~167.
- (5) DiGiovanni, D., Wang, C. Y., Morse, T. F. and Cipolla, Jr. J. W., 1986, "Laser Induced Buoyancy and Forced Convection in Vertical Tubes," *Natural Convection: Fundamentals and Applications*, S. Kakac, W. Aung and R. Viskanta, Editors, Hemisphere, New York, pp. 1118~1139.
- (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, pp. 151~155.
- (7) Kim, K. S. and Pratsinis, S. E., 1988, "Manufacture of Optical Waveguide Preforms by Modified Chemical Vapor Deposition," *AIChE J.*, Vol. 34, No. 6, pp. 912~920.
- (8) 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. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, No. 9, pp. 1977~1986.
- (9) Choi, M., Greif, R. and Baum, H. R., 1989, "A Study of Heat Transfer and Particle Motion Relative to the Modified Chemical Vapor Deposition Process," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 1031~1037.
- (10) Choi, M., Lin, Y. T., and Greif, R., 1990, "Analysis of Buoyancy and Tube Rotation Relative to the Modified Chemical Vapor Deposition Process," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 1063~1069.
- (11) 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.
- (12) 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, pp. 735~742.
- (13) Jia, G., Yener, Y. and Cipolla, Jr. J. W., 1992, "Thermophoresis of a Radiating Aerosol in Thermally Developing Poiseuille Flow," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 12, pp. 3265~3273.
- (14) Park, S. H. and Kim, S. S., 1993, "Thermophoretic Deposition of Absorbing, Emitting and Isotropically Scattering Particles in Laminar Tube Flow with High Particle Mass Loading," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, pp. 3477~3485.
- (15) Joh, S., Greif, R. and Lin, Y. T., 1993, "A Study of the Effects of Chemical Reaction on the MCVD Process," *J. of Material Processing & Manufacturing Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 369~386.
- (16) Park, K. S. and Choi, M., 1994, "Conjugate Heat Transfer and Particle Deposition in the Modified Chemical Vapor Deposition Process: Effects of Torch Speed and Solid Layer," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 11, pp. 1593~1603.

- (17) Lin, Y. T., Choi, M. and Greif, R., 1993, "An Analysis of the Effect of the Solid Layer for the Modified Chemical Vapor Deposition Process," *Wärme-und Stoffübertragung*, 28 , pp. 169~176.
- (18) Benedict, R. P., 1984, *Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements*, 3rd Ed., Wiley-Interscience, New York.
- (19) Joh, S. and Greif, R., 1994, "The Effects of SiCl_4 and GeCl_4 Oxidation, Variable Properties, Buoyancy and Tube Rotation on the Modified Chemical Vapor Deposition(MCVD) Process," *Accepted in Int. J. of Heat and Mass Transfer*.