

〈論 文〉

외부증착공정 (OVD)에서 열전달 및 입자부착에 관한 실험적 연구

김재윤* · 조재걸** · 최만수***

(1995년 4월 1일 접수)

An Experimental Study of Heat Transfer and Particle Deposition during the Outside Vapor Deposition Process

Jaeyun Kim, Jaegeol Cho and Mansoo Choi

Key Words : Optical Fiber(광섬유), Outside Vapor Deposition(외부증착), Thermophoresis(열영동)

Abstract

An experimental study has been carried out for the heat transfer and particle deposition during the Outside Vapor Deposition process. The surface temperatures of deposited layers, and the rates, efficiencies and porosities of particle deposition were measured. It is shown that the axial variation of the surface temperature can be assumed to be quasi-steady and that as the traversing speed of burner is increased, the deposition rate, efficiency and porosity increase due to the decreased surface temperature. As the flow rate of the chemicals is increased, both the thickness of deposition layers and the surface temperature increase. Deposition rate also increases, however, deposition efficiency decreases for tests done. Later passes in early deposition stage result in higher surface temperatures due to increased thickness of porous deposited layers, which cause the deposition rate, efficiency and porosity to decrease.

기 호 설 명

- K : 열영동계수 (thermophoretic coefficient)
- M_{SiCl_4} : $SiCl_4$ 의 분자량
- M_{SiO_2} : SiO_2 의 분자량
- T : 온도
- V_{burner} : 버너이송속도
- V_T : 열영동 속도 (thermophoretic velocity)
- x : 버너이송시작점으로부터의 축방향 절대좌표
- z : 버너출구로부터의 높이

그리스문자

- ν : 동점성계수

1. 서 론

Outside Vapor Deposition (OVD) 공정은 현재 사용되는 광섬유 제조공정중의 하나로 증착률이 높고 모재를 크게 만들 수 있는 장점을 가지고 있다. 일반적인 OVD 공정을 설명하면 다음과 같다. (Fig.1 참조)

회전하는 원형 모봉(target rod) 아래에 연료로

*서울대학교 대학원 기계공학과

**정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

***정회원, 서울대학교 기계공학과

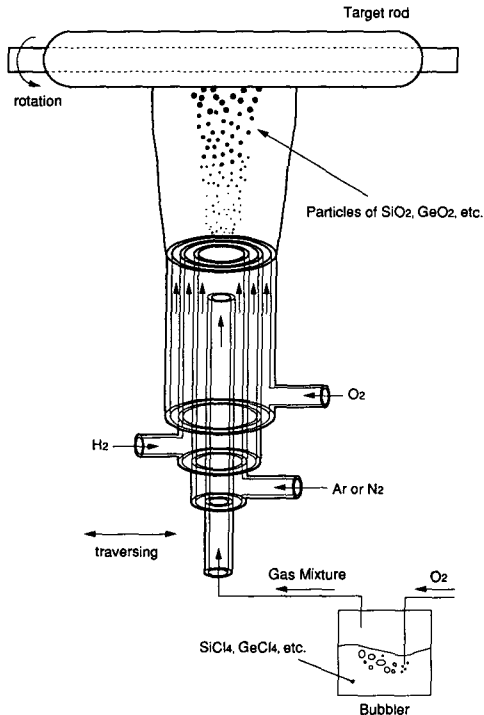


Fig. 1 Schematic of OVD deposition process

사용되는 수소 및 산소와 차단가스 (shield gas) 로 사용되는 질소, 아르곤 등과 SiCl_4 , GeCl_4 등의 화학 물질을 분출하는 버너가 축방향으로 반복이송된다. 버너에서 분출되는 수소와 산소의 연소로 인하여 버너표면 근처에서 SiCl_4 의 산화반응 (oxidation) 과 화염에 의한 가수분해 (flame hydrolysis) 가 일어나 SiO_2 입자가 형성되며 이 입자들은 버너에서 분출되는 고온의 가스와 함께 움직이다가 모봉의 주위를 지나면서 온도구배에 의한 열영동 (thermophoresis) 에 의해서 상대적으로 온도가 낮은 모봉에 부착된다. 버너를 반복적으로 이송시키면서 모봉에 층층이 다공성 입자부착층을 형성시키며 각 pass마다 화학가스 (SiCl_4 , GeCl_4 , etc.) 의 조성을 변화시켜 원하는 굴절률분포를 갖도록 한다. 원하는 증착두께가 되면 모봉을 입자부착층으로부터 분리시켜 제거한 후, $1400^\circ\text{C} \sim 1600^\circ\text{C}$ 의 온도를 유지하는 노 (furnace) 속에서 모봉이 제거된 중앙의 구멍으로 He , O_2 , Cl_2 등을 흘려 보내면서 건조 (drying) 과정과 소결 (sintering) 과정을 거쳐 투명한 원봉의 광섬유 모재 (preform) 를 만든다. 이 모재를 더 높은 온도 ($1800^\circ\text{C} \sim 2200^\circ\text{C}$) 의 노속에서 가열하여 가늘게 인발 (drawing), 코팅 (coating) 하

여 광섬유를 완성한다.

모재를 만드는 증착과정은 광섬유의 품질 및 생산성과 직결되므로 전체공정의 핵심을 이루게 되며 이러한 OVD 증착과정에서 발생하는 복잡한 열전달 및 입자 이동현상에 대한 이해를 도모하기 위하여 기존의 모델링에서는 주로 단순화된 형상, 즉 실린더나 평판 주위 유동을 대상으로 속도와 온도 분포를 계산하여 열영동에 의한 입자증착을 연구하였다. Homsy 등⁽¹⁾과 Batchelor와 Shen⁽²⁾은 균일 유동에 놓인 실린더 주변의 열영동으로 인한 입자증착을 연구하였으며 경계층이론을 사용한 Blasius series 해를 이용하였다. Garg와 Jayaraj⁽³⁾은 실린더 주위의 경계층 외부 유동에 압력구배를 주어 수치적으로 입자증착을 연구하였다. Alam 등⁽⁴⁾은 실린더 대신에 평판을 사용하여 수치적으로 열 및 물질전달을 해석하였으며 Kang과 Greif^(5,6)은 균일 유동대신에 보다 실제 공정에 가까운 제트 유동을 사용하여 곡선좌표계를 이용한 수치적 방법으로 OVD 공정중의 열전달, 유체유동 및 입자 증착을 해석하였다. Choi 등⁽⁷⁾은 입자부착층에서의 열전도를 포함하는 모델링을 사용하여 입자부착층과 버너 이송속도의 영향을 고려하였다. Choi 등⁽⁷⁾은 제외 한 대부분의 모델링에서는 실린더의 표면온도를 가정하였으며 토치이송속도의 영향은 고려하지 않았다. Bautista 등⁽⁸⁾은 모델링과 비교하기 위한 실험을 수행하였으며 모봉의 직경에 따른 입자증착 효율을 측정하여 이론적 모델링과 비교하였다. Graham과 Alam⁽⁹⁾은 회전하는 모봉에 정지하여 있는 버너를 사용한 입자 증착 실험을 수행하여 버너와 모봉사이의 거리 및 유량에 따른 증착효율을 측정하였으며 Hwang⁽¹⁰⁾은 전기장을 이용한 증착률 향상 연구를 위하여 원판을 사용한 실험을 수행하였다. Kim⁽¹¹⁾은 TiO_2 입자를 사용하여 실린더 위에 입자를 부착하는 실험을 하였으며 이론적인 수치계산도 병행하였다.

OVD 공정에 관한 실험적 연구는 이론적 연구에 비하여 부족한 실정이며 실험조건이 비교적 한정되어 있다. 특히 입자부착이 진행되면서 증가하는 부착층의 두께와 버너의 이송속도의 변화에 따른 입자 부착층의 표면온도와 증착성능에 대한 실험적 자료들은 미비한 상태이다. 이에 본 연구에서는 OVD증착과정에서의 열전달 및 입자부착에 대한 구체적인 실험자료를 확립하기 위하여 실제 공정과 유사한 실험장치를 구성하여 입자부착을 진행시키

면서 주요 공정인자, 즉 버너의 이송속도와 carrier gas(O₂)의 유량등이 증착성능에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 실험장치와 방법

OVD 공정에서의 입자증착을 연구하기 위한 실험장치의 전체적인 개략도를 Fig. 2에 나타내었으며 부분별 장치의 구성은 다음과 같다.

버너이송을 위한 1차원 이송장치를 구성하였으며 구동모터로 stepping motor를 사용하여 PC에서 pulse를 조절하여 반복이송되는 버너의 속도를 제어하였다. 또한, 모봉을 회전시키기 위하여 속도조절이 가능한 AC motor를 사용하여 회전속도를 60~120 rpm으로 변화시킬수 있도록 하였다. Bubbler에 담긴 SiCl₄ 액체 속으로 연결된 유리관으로 유입된 O₂가 SiCl₄를 증발시켜 혼합기체를 형성하게 되며 이 혼합기체는 버너의 중심부로 연결되어 분출된다. Bubbler로 유입되는 carrier gas O₂의 유량을 rotameter(OMEGA, FL-122)로 조절하여 버너로 주입되는 SiCl₄의 유량을 조절하였으며 rotameter는 O₂를 측정기체로 하여 wet test gasmeter로 보정하였다. 연료로 쓰이는 H₂, O₂와

차단가스로 쓰이는 N₂도 각각 wet test gasmeter를 사용하여 보정한 rotameter를 거쳐서 버너에 연결된다. 버너는 링모양의 분사홀을 반경방향으로 여러 개를 가지는 형상이며 중앙부분에서 SiCl₄와 O₂가 공급되고 그 주위로 N₂, H₂, O₂가 각각 공급된다. (Fig. 3 참조)

현재 광섬유 또는 석영유리(quartz)제조에 쓰이는 버너에서 SiCl₄가 분사되는 노즐부분이 SiO₂의 부착으로 막히는 것이 문제가 되는 경우가 있으며 이를 방지하기 위하여 질소(N₂) 또는 아르곤(Ar) 등의 불활성기체를 주위에 분사하여 차단가스(shield gas)로 사용하기도 한다. 그러나 이러한 차단가스의 다량사용은 화염온도를 낮추게 되어 효율의 저하를 가져올 수 있으므로 보다 효과적인 대책이 필요하며 이를 위해 본 실험에서는 SiCl₄가 분사되는 부분을 화염분사구보다 낮게 하여 분사부분의 온도를 낮게 유지시켜 불필요한 SiO₂의 형성을 방지할수 있는 버너를 설계, 제작하였다. 이 때 연료유량이나 기타 조건에 따라서 SiCl₄ 분사구의 높이를 조절이 가능하도록 하였다. 본 실험에서 차단가스를 사용하지 않았을 경우에는 SiCl₄ 분사구의 높이가 화염분사구와 같을 때와 화염분사구보다 낮을 때 모두 SiO₂가 부근에 부착되었으나 소량의

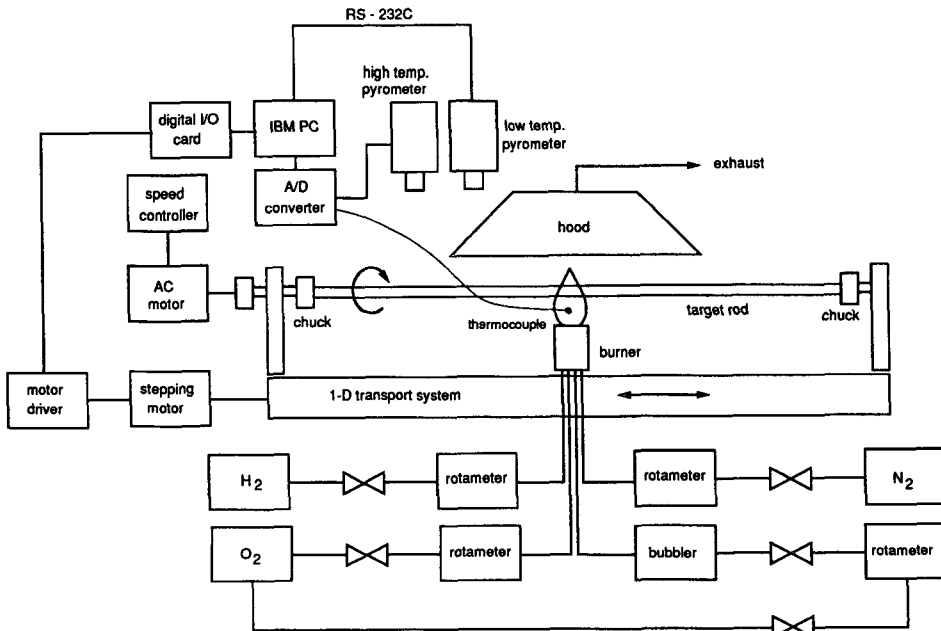


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

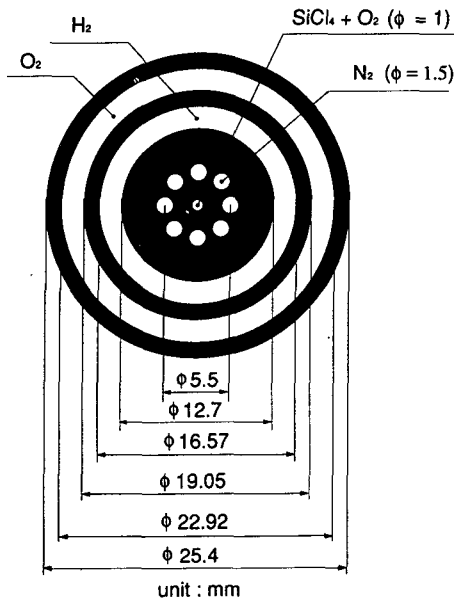


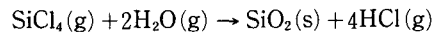
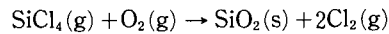
Fig. 3 Burner exit geometry

질소를 차단가스로 사용하였을 경우에는 SiCl_4 분사구의 높이를 낮추었을때만 SiO_2 가 부착되지 않음을 확인하였다.

버너화염의 온도 분포를 측정하기 위하여 선직경 0.015 inch의 B type (OMEGA, Pt/6%Rh-Pt/30%Rh) 열전대를 사용하였다. 온도 data는 A/D converter (KEITHLEY, DAS 8-PGA)를 통하여 PC로 연결되며 각 조건마다 3번씩의 실험을 수행하여 그 평균값들로 최종적인 화염온도분포를 구하였다. 증가하는 이중원봉의 표면온도는 2개의 적외선 온도계 (infrared thermometer)를 사용하여 측정하였다. 1000 °C 이상의 온도범위는 고온용 적외선 온도계 (IRCON, Series 7000-799C10, spectral response 4.8~5.2 μm)로 측정거리 330 mm (target diameter $\phi=3.3$ mm)에서 측정하였으며 그 이하의 온도범위는 저온용 적외선 온도계 (MINOLTA, FA-0510, spectral response 8~13 μm)로 측정거리 500 mm (target diameter $\phi=9$ mm)에서 측정하였다.

본 실험에서는 모봉으로 직경 19.05 mm, 길이 92 cm의 alumina봉 (normally 94% Al_2O_3)을 사용하였으며 반응물질로는 SiCl_4 를 사용하였다. 증착시 모봉의 중심으로부터 버너출구까지의 거리는 34 mm이며 모봉은 약 90 rpm으로 회전한다. 버너는 5~20 cm/min 범위내의 일정한 속도로 이동하다가

이동시작점으로부터 650 mm되는 지점에 도달하면 300 cm/min의 속도로 되돌아와서 다시 느린 속도로 이송을 시작한다. 버너가 이송을 마치고 되돌아올때는 bubbler로 유입되는 산소와 버너의 연료로 사용되는 산소를 차단시켜 증착이 일어나지 않게 하였다. 증착시 연료로 사용되는 H_2 의 유량은 5.8 l/min, O_2 의 유량은 7.3 l/min으로 하였고 (equivalence ratio=0.4), 차단가스인 N_2 는 1 l/min, SiCl_4 를 bubbling하는 carrier gas O_2 의 유량은 0.3~0.7 l/min으로 조절하였다. 증착과정중 다음과 같은 두가지의 화학반응이 발생하여,



SiO_2 입자가 생성되며 이 입자들은 열영동력 (thermophoretic force)에 의해 회전하는 모봉에 부착된다. 증착이 진행되면서 입자부착층의 두께가 커지는 이중원봉의 표면온도는 앞서 언급한 바와 같이 2개의 적외선 온도계를 사용하여 측정한다. 표면의 방사율을 설정하기 위하여 B type 열전대를 입자층 표면에 설치하고 봉을 회전시키지 않은 상태에서 이송되는 버너로 가열하면서 두 적외선 온도계와 열전대에 의한 온도측정을 병행하여 측정된 각각의 온도분포를 비교하였다. 저온용 온도계의 경우 (spectral response 8~13 μm), 다공성 입자부착층의 방사율은 약 1.0으로 일정하였으나 고온용 온도계의 측정과장 범위 (4.8~5.2 μm)에서는 입자부착층의 다공성도에 따라 방사율이 변화하였으므로 표면온도가 1000 °C를 넘는 경우에는 각 증착조건에 따라 위와 같은 방법으로 방사율을 설정하였으며 이렇게 설정된 방사율을 봉이 회전하는 경우에도 사용하였다. 또한 원주방향의 온도변화는 측방향에 비해 매우 작으므로 무시하였으며 Choi 등¹⁷⁾의 결과는 이와 같은 가정이 어느 정도 타당함을 보여주고 있다.

실험시의 SiCl_4 의 질량유량은 electronic balance (OHAUS, GT4100)을 사용하여 실험전후의 bubbler 무게변화를 측정하여 구한다. 측정된 SiCl_4 의 질량으로부터 최대로 형성될 수 있는 SiO_2 의 질량을 계산할 수 있으며 실험 전후의 봉의 무게변화, 즉 실제로 부착된 SiO_2 의 질량과 비교하여 증착효율을 구한다. 증착률은 부착된 SiO_2 의 질량과 증착 시간으로부터 구할 수 있으며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

입자증착률 = 부착된 SiO_2 의 질량 / 부착에 소요된

시간
= 봉의 무게변화/(버너이송거리/이송
속도)

입자증착효율=부착된 SiO₂의 질량/최대 생성가
능한 SiO₂의 질량=(봉의 무게변
화/M_{SiO₂})/(bubbler의 무게변화/
M_{SiCl₄})

여기서, M_{SiO₂}는 SiO₂의 분자량이고 M_{SiCl₄}는 SiCl₄
의 분자량이다.

입자부착층의 다공성도(porosity)는 입자증착의
후속과정인 건조(drying)및 소결(sintering)과정에
서 유용한 자료로 활용되며 특히 소결과정에서 공
정시간과 광섬유 모재내의 기포및 균열의 발생에
영향을 끼친다. 본 실험에서는 밀도비를 이용하여
다공성도를 계산하였다. 즉, 증착된 두께가 축방향
으로 거의 일정하다고 가정하면 증착전후의 두께변
화와 버너이송거리로부터 부착된 입자의 부피가 계
산되며 이를 증착된 질량으로 나누면 증착된 입자
부착층의 평균적인 밀도를 알 수 있으므로 완전히
소결된 SiO₂(fused silica)와의 밀도비로부터 다공
성도를 계산할수 있다. 이때 증착된 입자층의 두께
는 0.01 mm 정확도의 cathetometer(MARUBI-
SHI, PRM-5)를 사용하여 서로 다른 네 지점에서
실험전후의 모봉의 직경의 변화를 측정하여 그 평
균값으로 하였고 증착질량은 실험 전후의 모봉의
무게 변화를 측정하여 구하였다.

본 실험에서 측정된 화염온도, 이중원봉의 표면
온도, 증착률, 증착효율 및 다공성도에 대한 불확
실성 해석(uncertainty analysis)을 Benedict⁽¹²⁾의
방법에 의하여 수행하였다. 랜덤오차(random
error)에 의한 화염온도의 상대적 불확실도(relu-
ative uncertainty)는평균±6.3%로나타났으며 V_{burner}
=10 cm/min, carrier gas O₂=0.5 l/min의 증착조
건에서 4 pass 증착시킨 경우에 증착률, 증착효율
및 다공성도의 상대적 불확실도는 각각 ±11.7%,
±4.5%, ±2.9%로 추정되었다. 실험실내의 온도
변화에 따른 bubbler의 온도변화와 carrier gas의
유량조절에 rotameter를 사용함으로써 SiCl₄의 질
량유량은 큰 불확실도(±14.5%)를 보였으며 그에
따른 랜덤오차가 증착률이 비교적 큰 불확실도를
갖는 주된 원인으로 추정된다. 또한 위의 증착조건
에서 측정된 4 pass시의 최고표면온도(maximum
surface temperature)의 상대적 불확실도는 ±6.
7%로 추정되었다.

3. 결과 및 토의

OVD 공정에서 입자부착 메카니즘은 대부분 열
영동에 기인한다. 열영동(thermophoresis)은 미세
한 입자가 온도구배가 있는 기체중에 있을때 입자
와 기체분자의 운동량의 교환으로 입자가 온도가
높은 곳에서 낮은 곳으로 움직여 증착하는 것을 말
하며 열영동속도는 다음과 같은 식으로 표현된다.
(13)

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

여기서, K는 열영동계수이며 ν는 동점성계수이
다. 따라서 증착과정에서 모봉주위의 유동장의 온
도분포는 매우 중요하며 이 온도분포는 화염의 온
도분포에 의해서 결정된다. 특히 생성된 입자들의
성장(growth)은 온도에 의존하는 SiO₂의 viscosity
에 크게 영향을 받으므로(Ulrich와 Riehl⁽¹⁴⁾) 실험
에 사용되는 토치의 특성을 파악할 수 있는 화염온
도분포의 측정이 필요하며 이러한 온도분포는 또한
OVD 공정의 모델링에 사용될 수 있다. 본 실험에
서는 실제 증착과는 달리 SiCl₄를 주입하지 않아
SiO₂ 입자의 생성이 없이 H₂와 O₂의 연소만 일어
나는 상태에서 버너출구로부터의 높이에 따라 화염
의 반경방향 온도분포를 측정하였다. 그러나 실제
증착의 경우 화염내에 실리카(silica)입자가 존재한
다 하더라도 고온에서 많은 복사열을 방출하는 탄
소 매연입자와는 달리 그 복사열이 주변의 유동장
과 온도장에 미치는 영향이 무시될 수 있음이 기존
의 실험결과로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 따라서 청정화염상

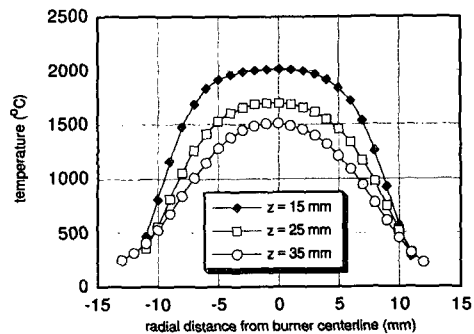


Fig. 4 Flame temperature distributions without N₂
(H₂=3.5 l/min, O₂=12 l/min, N₂=0 l/min, no
carrier gas)

태에서 측정된 온도분포는 실제 공정에서의 화염 온도분포를 나타낸다고 할 수 있다. 또한, 고온의 기체속에 삽입된 열전대가 나타내는 온도는 bead의 복사에 의한 열손실로 인하여 실제의 가스의 온도보다 낮게 되므로 적당한 방법으로 이에 대한 보정을 해주어야 한다. bead로 연결된 선을 통한 전도 열전달과 열전대의 삽입으로 인한 화염유동장의 변형에 따른 효과들을 무시하면, 주위가스에 의한 bead로의 대류 열전달량은 bead의 복사에 의한 열손실과 같다는 열전대 bead에 대한 에너지평형을 얻을 수 있다.⁽¹⁵⁾ 이러한 방법으로 열전대의 복사로 인한 열손실을 보정하여 실제 화염온도를 계산하였으며 열전대가 나타내는 온도와 화염온도는 최고 약 306 °C의 차이를 보였다.

화염의 온도분포는 주로 버너의 형상에 의해 좌우되며 본 실험에 쓰인 버너에 산소 12 l/min, 수소 3.5 l/min를 주입할 경우의 화염의 반경방향 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 이 경우, 버너출구로부터의 거리가 멀어질수록 중심부분의 온도는 감소하였으며 온도분포의 형상은 위치에 관계없이 일정한 형태를 유지하였다. Fig. 5는 같은 연료유량 조건에서 차단가스용 질소 2 l/min 을 주입한 경우의 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 4와는 달리 버너표면 근처에서의 중심부 온도는 주위보다 낮아지는데 이는 중심의 분사구 주변에서 분출되는 불활성가스인 질소가 주변의 화염면에서 형성된 고온가스가 중심으로 확산되는 것을 차단하기 때문이다. 그러나 측정위치가 높아질수록 온도분포는 Fig. 4와 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다. 차단가스로 쓰이는 질소의 주입은 중심부의 온도를 낮추어 앞서 언급한 바와 같이 버너출구가 막히는 것을 방지

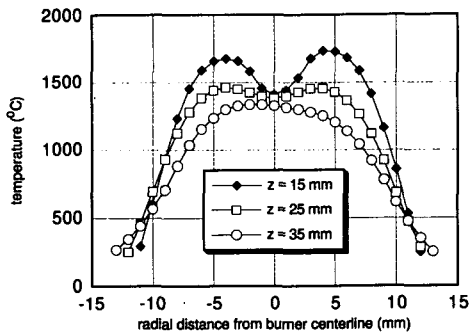


Fig. 5 Flame temperature distributions with N₂ (H₂ = 3.5 l/min, O₂ = 12 l/min, N₂ = 2 l/min, no carrier gas)

하는 역할을 하지만 전반적인 온도의 감소로 인해 열영동효과를 감소시키므로 보다 효율적인 증착을 위해서는 각 공정조건과 버너 형상에 따른 적당량의 질소 주입이 필요하리라 생각된다.

본 실험에서는 회전하는 이중원봉의 축방향 표면

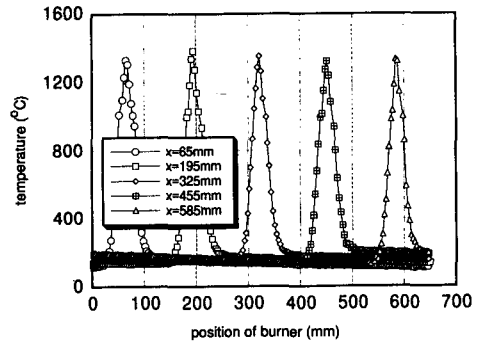


Fig. 6(a) Transient temperature variations for different axial locations (V_{burner} = 10 cm/min, carrier gas O₂ = 0.5 l/min, 4 pass)

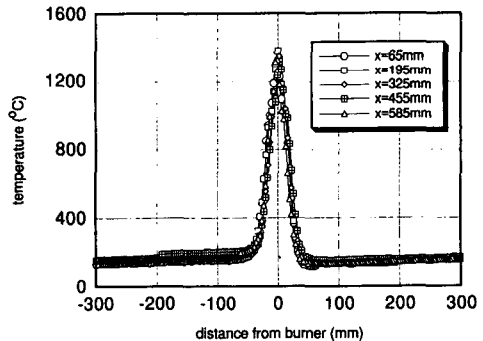


Fig. 6(b) Temperature variations for different axial locations in moving coordinate (V_{burner} = 10 cm/min, carrier gas O₂ = 0.5 l/min, 4 pass)

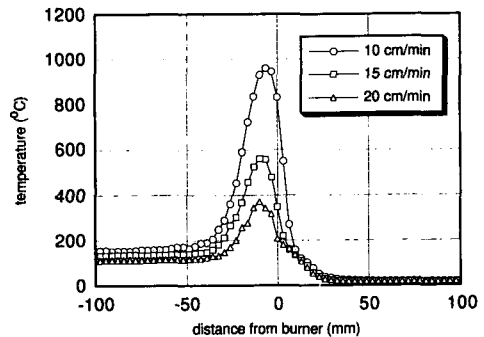


Fig. 7 Effect of burner speed on surface temperature distributions (carrier gas O₂ = 0.5 l/min, 1 pass)

온도분포를 측정하기 위하여 버너와 함께 이동하는 이동좌표계에서는 측방향 온도분포가 정상상태의 분포, 즉 버너와의 상대거리에 의해서만 결정되는 온도분포를 가진다고 가정하였다. 이 같은 준정상상태(quasi-steady state)가정을 검증하기 위하여 먼저 측방향에 따라 각기 다른 지점의 온도를 동일한 조건에서 시간에 따라 측정하였다. Fig. 6(a)는 버너 속도 10 cm/min, carrier gas O₂의 유량이 0.5 l/min일때 4번째 pass에서 측방향으로 서로 다른 5개의 측정지점의 온도변화를 버너의 이동거리 즉, 시간에 따라 표시한 것이다. 버너근처에서만 급격한 온도상승이 일어나며 각 지점의 온도는 측정지점의 거리만큼 평행이동되어 나타남을 볼 수 있다. Fig. 6(b)는 이것을 다시 이동좌표계에서의 위치 즉, 버너로부터의 상대거리에 따라 표시한 것으로 여러 지점의 온도분포가 하나의 곡선으로 일치함을 알 수 있으며 이는 이중원봉의 표면온도가 버너와의 상대거리에 의해서만 결정되는 준정상상태 분포

를 가짐을 입증해 주는 것이다. 또한 버너부근을 제외한 곳에서는 표면온도가 거의 일정함을 알 수 있는데 이 같은 사실은 준정상상태 가정과 더불어 OVD 증착공정의 모델링에 유용한 자료로 사용될 수 있을 것이다.

Fig. 7은 버너이송속도의 변화에 따른 1 pass의 표면온도분포를 나타내고 있다. 버너의 이송속도가 증가할수록 버너로부터 받는 열전달량이 감소하고 증착된 입자층의 두께가 감소하여 단열효과가 감소하므로 최고 온도는 낮아지게 된다. Fig. 8은 버너 이송속도가 5, 10, 15 cm/min일때 고온용 온도계의 방사율을 각각 0.45, 0.4, 0.35로 설정하여 측정된 4 pass에서의 온도분포를 나타낸 것으로 Fig. 7과 같은 경향을 보이고 있으나 증착이 진행되면서 그 차이는 많이 감소하였음을 알 수 있다.

버너이송속도의 증가에 따른 표면온도의 감소는 봉에 수직인 방향의 온도구배를 증가시켜 열영동력을 증가시키므로 증착효율이 증가할 것으로 예상되

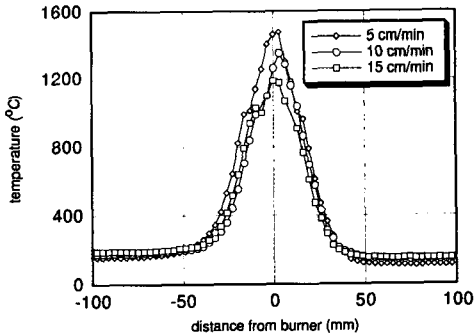


Fig. 8 Effect of burner speed on surface temperature distributions (carrier gas O₂=0.5 l/min, 4 pass)

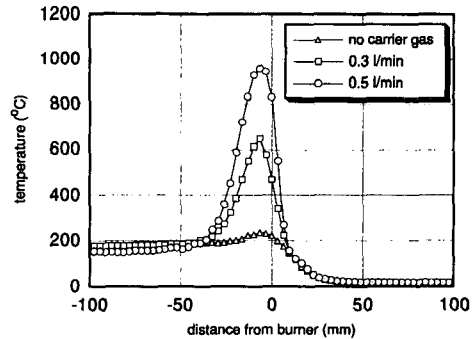


Fig. 10 Effect of carrier gas flow rate on surface temperature distributions ($V_{\text{burner}}=10$ cm/min, 1 pass)

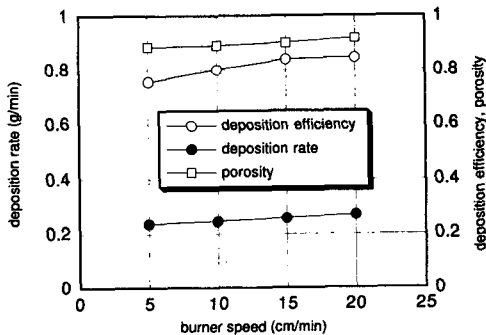


Fig. 9 Deposition efficiency, rate and porosity for various burner speeds (carrier gas O₂=0.5 l/min)

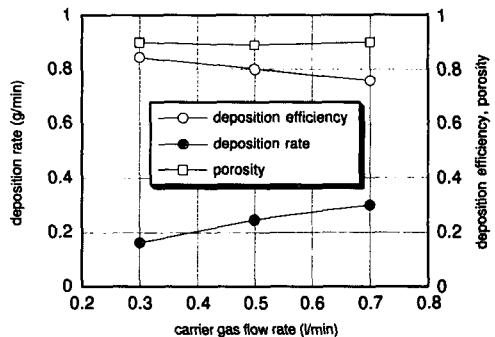


Fig. 11 Deposition efficiency, rate and porosity for various carrier gas flow rate ($V_{\text{burner}}=10$ cm/min)

며 이는 Fig. 9에서 확인할 수 있다. Fig. 9는 4 pass 동안 증착시킨 경우의 증착성능을 나타낸 것으로 버너이송속도가 증가함에 따라 증착효율이 증가하는 경향을 볼 수 있으며 같은 양의 SiCl_4 가 버너로 유입될때 증착효율의 증가는 입자증착률의 향상으로 나타나고 있다. 이러한 경향은 Choi 등⁽⁷⁾의 결과와도 일치하는 것이다. 또한 버너이송속도의 증가에 따른 표면온도의 감소로 인하여 증착된 입자층의 다공성도는 증가함을 알 수 있는데 이러한 다공성도의 증가는 이후의 소결(sintering) 과정에서 문제를 발생시킬 수 있다. 즉, 다공성 모재의 pore의 크기가 어느 정도 이상 커지게 되면 소결 과정에서 온도가 증가함에 따라 pore의 크기가 증가하여 소결과정후 모재내부에 bubble이 존재하게 되므로,⁽¹⁶⁾ 버너의 이송속도는 다공성도에 의해 제한을 받게 된다.

Fig. 10은 carrier gas O_2 의 유량, 즉 SiCl_4 유량의 변화에 따른 표면온도분포를 나타낸 것이다. 모봉에 SiO_2 입자들이 부착되면 모봉과 입자부착층의 열전도계수의 큰 차이로 인해 입자층의 유무에 따라 온도분포가 상당히 차이를 보이게 된다. 즉, 모봉만 있는 경우에는 큰 열전도계수로 인해 낮은 온도분포를 보이며 입자가 부착되면 다공성 입자부착층의 작은 열전도계수때문에 온도가 급격히 상승하게 된다. Carrier gas의 유량이 증가하면 버너에서 분출되는 SiCl_4 의 유량이 증가하여 모봉에 부착된 입자층의 두께가 더 커지게 되므로 부착된 입자층의 단열효과로 인해 유량이 커질수록 더 높은 온도분포를 보이고 있다. Fig. 11은 carrier gas 유량을 변화시켜 4 pass 동안 증착시킨 경우의 증착효율과 증착률, 다공성도를 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 표면온도의 상승으로 인해 열영동속도가 감소하게 되어 증착효율은 감소하였으나 버너에서 분출되는 SiCl_4 의 유량이 증가하므로 증착률은 증가하였다. 분사구의 지름이 일정할때 유량을 더욱 증가시키면 분출되는 SiCl_4 의 속도가 증가하여 화염에 의해 가열되는 시간이 짧아지므로 그에 따른 불완전반응으로 인해 입자부착효율은 더욱 감소할 것으로 예상된다. 또한, 다공성도는 유량에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 유량 증가에 따른 표면온도의 상승효과와 속도 증가로 인해 화염내에 머무르는 시간이 줄어드는 효과가 서로 상쇄된 것으로 볼 수 있다.

Fig. 12는 증착 pass의 증가에 따른 표면온도분

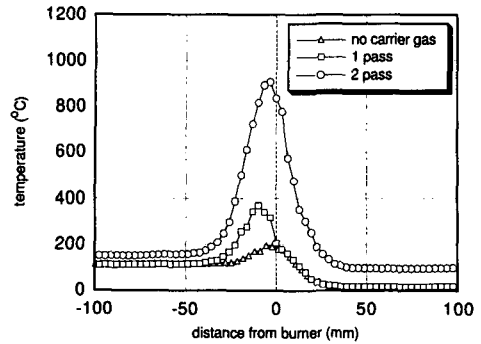


Fig. 12 Axial surface temperature distributions for different passes ($V_{\text{burner}}=20$ cm/min, carrier gas $\text{O}_2=0.5$ l/min)

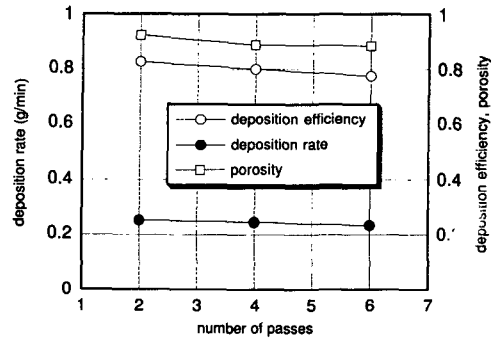


Fig. 13 Deposition efficiency, rate and porosity for different number of passes ($V_{\text{burner}}=10$ cm/min, carrier gas $\text{O}_2=0.5$ l/min)

포를 나타낸 것이다. 증착이 일어나는 경우 모봉만 가열하는 경우에 비해 온도가 상승하며 증착이 진행됨에 따라 입자부착층 두께가 증가하므로 표면온도가 증가하고 있다. Fig. 13은 같은 조건($V_{\text{burner}}=10$ cm/min, carrier gas $\text{O}_2=0.5$ l/min)에서 각각 2, 4, 6 pass 동안 증착시킨 경우의 증착성능을 나타낸 것으로 pass가 증가함에 따른 표면온도의 증가로 인해 평균적인 증착효율, 증착률, 다공성도가 모두 감소함을 알 수 있다.

4. 결 론

OVD 공정에서의 열전달 및 입자부착에 관한 실험적 연구를 수행하였으며 원봉의 표면온도, 증착률, 증착효율, 다공성도 등을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차단가스인 질소의 주입은 화염온도, 특히

버너중심부의 온도를 감소시킴을 확인하였다.

(2) 증착과정에서 원봉의 표면온도는 준정상상태로 가정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다.

(3) 버너이송속도가 증가할수록 표면온도가 감소하여 증착효율과 증착률이 증가하나 다공성도 역시 증가하므로 버너의 속도는 다공성도에 의해 제한된다.

(4) SiCl₄와 O₂ 혼합기체의 유량이 증가할수록 표면온도가 상승하여 증착효율은 감소하였으나 증착률은 증가하였다.

(5) OVD 증착공정 초기에 증착 pass가 증가할수록 표면온도가 증가하여 증착효율, 증착률, 다공성도가 모두 감소하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 교육부 학술진흥재단의 지원(과제번호 : ME93-A-13)에 의해 이루어졌음을 밝힌다.

참고문헌

- (1) Homsy, G. M., Geyling, F. T. and Walker, K. L., 1981, "Blasius Series for Thermophoretic Deposition of Small Particles," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 83, No. 2, pp. 495~501.
- (2) Batchelor, G. K. and Shen, C., 1985, "Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 107, No. 1, pp. 21~37.
- (3) Garg, V. K. and Jayaraj, S., 1990, "Thermophoretic Deposition Over a Cylinder," *Int. J. of Engineering Fluid Mechanics*, Vol. 3, No. 2, pp. 175~196.
- (4) Alam, M. K., Graham, G. M., Janakiraman, V. and Greaves, J., 1990, "Numerical Analysis of Thermophoretic Transport in the OVD Process," ASME HTD-Vol. 130, *Numerical Heat Transfer*, pp. 67~72.
- (5) Kang, S. H. and Greif, R., 1992, "Flow and Heat Transfer to a Circular Cylinder with a Hot Impinging Air Jet," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 35, No. 9, pp. 2173~2183.
- (6) Kang, S. H. and Greif, R., 1993, "Thermophoretic Transport in the Outside Vapor Deposition Process," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 4, pp. 1007~1018.
- (7) Choi, M., Song, Y. and Kang, S. H., 1995, "Conjugate Heat Transfer and Particle Transport in Outside Vapor Deposition Process," *Numerical Heat Transfer*, in press.
- (8) Bautista, J. R., Walker, K. L. and Atkins, R. M., 1990, "Modeling Heat and Mass Transfer in Optical Waveguide Manufacture," *Chemical Engineering Progress*, pp. 47~52.
- (9) Graham, G. M. and Alam, M. K., 1991, "Experimental Study of the Outside Vapor Deposition Process," *J. of Aerosol Science and Technology*, Vol. 15, pp. 69~76.
- (10) Hwang, J., 1991, "Flame Deposition Processes in Materials Manufacturing," Ph. D. Dissertation, University of California at Berkeley.
- (11) Kim, Y. J., 1991, "Particle Transport and Deposition from Non-Isothermal Gas-Particle Flows," Ph. D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (12) Benedict, R. P., 1984, *Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurements*, 3rd Ed., John Wiley & Sons.
- (13) Talbot, L., Cheng, R. K., Schefer, R. W., and Willis, D. R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 101, Part 4, pp. 737~758.
- (14) Ulrich, G. D., and Riehl, J. W., 1982, "Aggregation and Growth of Submicron Oxide Particles in Flames," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 87, No. 1, pp. 257~265.
- (15) Chung, S., and Katz, J. L., 1985, "The Counter Diffusion Flame Burner : A New Tool for the Study of the Nucleation of Refractory Compounds," *Combustion and Flame*, Vol. 61, pp. 271~284.
- (16) Niizeki, N., Inagaki, N., and Edahiro, T., 1985, "Vapor-Phase Axial Deposition Method," in *Optical Fiber Communications*, Vol. 1, Edited by Li, T., Academic Press, pp. 97~177.