

광섬유 제조 화학증착 기술



최 만 수

서울대학교 기계공학과 교수

●1957년생.
●열전달을 전공하였으며, 화학증착(CVD), 광섬유 제조 공정 등 열가공공정에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

최근 세계적으로 정보통신량이 급속히 증대되고 과학과 공학의 광범위한 부분에서 광섬유를 이용한 제품들이 개발되면서 광통신의 정보 전달 매체인 광섬유의 수요가 급증하고 있다. 이에 따라 광섬유의 질을 향상하고 생산단가를 줄이려는 연구개발에 많은 관심이 모아지고 있다. 광섬유의 생산량이 최근 5년 동안 약 100 배로 증가되고 앞으로의 수요가 급증할 것으로 기대되어⁽¹⁾ 보다 질 좋고 값싼 광섬유 제조 공정의 개발이 시급하다. 1980년대 초부터 이루어진 연구 결과로부터 질적인 면에서나 생산성의 측면에서 괄목할 만한 향상이 이루어져 왔으며 이러한 추세는 현재 계속 진행되고 있다. 광섬유 제조과정은 복잡한 여러가지의 공정을 포함하는데 이러한 각 공정의 혁신과 최적화가 연구 개발의 초점이 되고 있으며 각 공정의 원리를 이해하는 것이 선행되어야 할 것이다. 이 글에서는 광섬유 제조에 쓰이는 여러가지 화학증착 기술을 설명하고 광섬유 제조의 생산성과 질을 결정지어 주는 공정 인자들의 영향을 검토하며 또한 성능 해석을 위한 방법을 설명한다.

2. 광섬유 제조 화학증착 기술

2.1 광섬유의 특성 및 종류

광섬유는 빛의 전반사를 이용하여 광 신호를

전달하는 매체로서 머리카락 굵기의 가느다란 유리질로 만들어져 있다. 광섬유의 단면적에서의 굴절률 분포를 살펴보면 빛의 전반사를 유발하기 위하여 중심부가 바깥부분보다 약간 높은 굴절률을 가지게 되며 이의 제조는 광섬유의 주요 재료인 SiO_2 에 소량의 불순물들을 첨가함으로써 가능하다. GeO_2 는 굴절률을 높이는 데에 쓰이는 물질이며 불소의 첨가는 SiO_2 의 굴절률을 낮추어 바깥부분의 증착에 사용된다. 광섬유 단면적에서의 굴절률 분포가 광신호가 전달되는 양상을 결정하며 광신호가 여러 개의 경로(light path)를 통하여 전달되는 다중모드(multi mode)와 하나의 경로만이 가능한 단일 모드(single mode)로 나누어진다. 다중모드에서는 모드 간 상호작용에 의한 광신호의 산란 손실이 큰 문제가 되며 이를 최소화하기 위하여 근사적으로 포물선 형태의 굴절률 분포를 만들게 된다. 단일 모드에서는 모드간 산란 손실이 없으므로 주요한 손실 요인은 물질 자체에 의한 손실(material dispersion)과 레이저로부터 나온 광에너지가 광섬유의 단면적에 퍼져 있으며 각 지점마다 굴절률이 다르고 따라서 전달 속도가 달라져 일어나는 도파관(wave guide) 산란으로 나눌 수 있다. 그러므로 단일 모드에서의 산란손실은 굴절률 분포에 의지하며 일반적으로 사용되는 step index 단일 모드 광섬유는 파장 $1.3\mu\text{m}$ 근처에서 물질 손실과 도파관 손실을 합친 총 산란 손실이 영이 되며 이에 따라서 광원의 파장을 결정하

게 된다. 복잡한 굴절률 분포의 조절로 영산점(zero dispersion point)을 $1.55\mu\text{m}$ 로 옮길 수 있으며 이를 dispersion shifted fiber라 한다. 이러한 굴절률 분포의 조절은 2.2에 언급할 화학증착 과정을 통하여 가능하다. 특수 광섬유로서 편광된 신호를 전달하는 편광유지 광섬유(polarization maintaining fiber)⁽²⁾와 Er이나 Nd 같은 희토류 물질을 첨가하여 만든 광증폭 광섬유 등을 들 수 있으며 이의 제조는 2.2에서 설명할 기존 CVD의 수정된 방법이 요구된다.⁽³⁾

2.2 광섬유 제조 화학증착 기술

광섬유는 원통 모양의 광섬유 모재(preform)를 인발하여 얻으며 외경이 $125\mu\text{m}$ 인 표준 광섬유의 굴절률 분포가 모재 안에서의 분포와 일치하며 또한 굴절률이 높은 중심부(core)와 상대적으로 낮은 굴절률을 가지는 바깥부분(clad)의 두께비 역시 같게 된다는 점에서 모재의 제조 공정이 광섬유의 질과 가격에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 절에서는 모재의 제조 방법중 현재 세계적으로 많이 쓰이는 화학증착 방법에 대하여 설명하고자 한다. 높은 증기압을 갖는 순수한 SiCl_4 나 GeCl_4 와 같은 액체의 제조가 실용화되어 이의 증기를 이용한 화학증착을 사용하여 불순물의 농도를 줄이고 흡수 손실이 매우 작은 실리카(silica)를 주 물질로 하는 광섬유제조가 가능하여 졌다. 현재 많이 쓰이는 증착 방법으로는 미국 Bell연구소에서 개발한 수정된 화학증착(modified chemical vapor deposition)⁽⁴⁾과 미국 Corning사의 OVD(outside vapor deposition)⁽⁵⁾ 그리고 일본에서 개발된 VAD(vapor axial deposition)⁽⁶⁾와 독일 Philips 연구소에서 개발한 PCVD(plasma chemical vapor deposition)⁽⁷⁾를 들 수 있다.

그림 1은 수정된 화학증착법(MCVD)의 개략도를 나타내며, 수정된 화학 증착과정(MCVD)을 설명하면 다음과 같다. 회전하는 실리카 원관안으로 SiCl_4 , GeCl_4 그리고 O_2 등의 화학반

응 기체를 통과시키고 원관의부에서 축방향으로 이동하는 O_2/H_2 토치로써 원관을 가열시킨다. 가열로 인하여 원관 내부의 혼합기체의 온도가 상승되며 어느 지점에 이르러서는 화학반응온도를 넘게 되어 화학반응이 일어나고 SiO_2 나 GeO_2 와 같은 미세한 입자가 형성되어진다. 이 입자들이 혼합기체와 함께 움직이다 원관내벽에 부착되며 토치가 축방향으로 일회 이동할 때 한 층의 부착이 이루어진다. 수십 층을 부착시킨 후 토치의 온도를 높여서 원관을 수축(collapsing 과정)시켜 원봉형태의 광섬유 모재(preform)를 만들어 인발과정을 통하여 가는 광섬유를 뽑아내게 된다. 수정된 화학증착과정(MCVD)에서 입자 부착(particle deposition) 메카니즘은 thermophoresis로서 미세한 입자가 온도구배가 있는 기체 중에 있을 때 그 입자와 기체 분자와의 운동량의 교환으로 입자가 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하여 증착하는 것을 말하며 thermophoretic 속도는 다음 식으로 쓸 수 있다.⁽⁸⁾

$$V_T = -\frac{Kv}{T} \nabla T \quad (1)$$

여기서, K 는 thermophoretic coefficient로서 입자의 크기 및 물성치 또한 주위 기체의 물성치에 의존하는 값이며 v 는 기체의 동점성 계수이다. 따라서 기체 내의 온도장의 결정은 증착과정을 이해하는데 필수적이며 유동장 역시 입자의 궤적을 구하는데 필요하게 되어 증착과정 동안의 열전달과 유체유동, 입자부착이 증착 성능 해석에 중요한 자료를 제공한다. SiO_2 를 주요 재료로 하는 모재 내의 굴절률 조

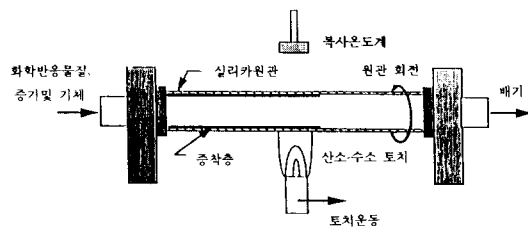
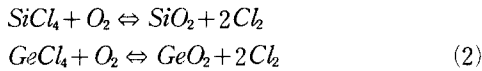


그림 1 수정된 화학증착법(MCVD)의 개략도

질은 각 부착층마다 SiCl_4 , GeCl_4 , SiF_4 의 양을 조절하여 화학반응으로 생성되는 GeO_2 입자와 F-SiO_2 등의 부착량을 조절하여 원하는 분포를 만든다. MCVD에서는 입자를 원관의 내벽에 부착하므로 바깥부분을 먼저 부착하고 나중에 중심부분을 부착시킨다. 그와 He과 소량의 POCl_3 을 흘려보냄으로써 화학반응으로 P_2O_5 등을 생성 첨가시켜 공정온도를 낮추어 기포가 없는 안정된 부착층을 만들게 된다.

MCVD과정 중에 일어나는 주요한 화학 반응을 살펴보면 다음과 같다.



여기서, 평형상수는 다음과 같이 정의되며 a 는 activity를 의미한다.

$$\begin{aligned} K_{\text{SiO}_2} &= \frac{a_{\text{SiO}_2} (P_{\text{Cl}_2})^2}{P_{\text{SiCl}_4} P_{\text{O}_2}} \\ K_{\text{GeO}_2} &= \frac{a_{\text{GeO}_2} (P_{\text{Cl}_2})^2}{P_{\text{GeCl}_4} P_{\text{O}_2}} \end{aligned} \quad (3)$$

온도가 약 1500K에서 $K_{\text{SiO}_2} \approx 10^5$ 이며 $K_{\text{GeO}_2} \approx 1$ 이 되며 따라서 SiO_2 는 거의 100% 생성되나 GeO_2 는 불완전 반응이 일어나 GeCl_4 의 많은 양이 반응을 하지 않고 출구로 빠져나가 손실을 일으킨다. 또한 SiO_2 가 생성될 때 만들어지는 Cl_2 는 반응을 더욱 왼쪽으로 향하게 하여 GeO_2 의 생성을 방해한다. 굴절률 분포를 조절하는 GeO_2 의 농도를 예측하는 것은 중요하며 GeO_2 의 몰분율은 아래식으로 표시된다.

$$X_{\text{GeO}_2} = \frac{C(P_{\text{O}_2})(P_{\text{GeCl}_4})}{\gamma(P_{\text{Cl}_2})^2} \quad (4)$$

여기서, $C/\gamma \approx 0.1-0.14$ 이며, 원하는 GeO_2 의 농도를 각 기체들의 분압을 조절하여 얻을 수 있다.

화학반응과 입자 운동 및 부착에 이어 중요한 과정은 소결과정이다. 소결(sintering)이란 thermophoresis로 원관의 내벽에 달라붙은 다공성의 입자군을 용융 접착시키는 작업을 말하며 MCVD에서는 입자 부착과 소결을 동시에

수행할 수 있는 장점을 가지고 있다. 토치 앞부분의 내벽에 부착된 다공성의 입자군을 실리카 원관의 외부에서 축 방향으로 이동하는 토치가 부착 부분을 지나면서 용융 소결시키게 된다. MCVD과정 중의 소결 메카니즘은 점성 소결로서 소결속도는 아래식으로 표시된다.

$$\dot{S} \propto \sigma t_s / \mu l_o (1 - \epsilon_o)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

여기서, σ 는 표면장력, ϵ_o 는 초기 다공률 그리고 l_o 는 초기 공극크기 그리고 $t_s = L_H / V_{\text{Torch}}$ 를 의미한다. L_H 는 토치 가열 구간의 길이이며 V_{Torch} 는 토치 이동 속도로서 완전한 소결을 위한 조절 인자이며 화학증착 과정 중 쓰이는 여러 화학 물질중 POCl_3 가 소결과정에서 중요한 역할을 하게 된다. POCl_3 의 존재는 입자 성장 속도를 빠르게 하여 화학반응 등온선 부근에서 입자성장을 완료시키며 따라서 그 입자의 농도 분포가 단일 온도 즉 화학 반응 온도에서 결정된다고 볼 수 있어 부착되는 입자들의 농도가 균일하여 지며 이는 단일 부착층에서의 점성이 균일함을 의미하고 결국 균일한 소결이 이루어진다. POCl_3 가 없으면 입자 성장이 느려지고 화학반응이 일어나는 곳에서 생성된 입자가 기체와 함께 이동하면서 성장하며 이동하는 궤적에 따라서 입자가 경험하는 온도가 변하게 되어 각 입자들의 농도 분포가 달라지게 되므로 따라서 부착층의 점성이 균일치 않게 되어서 균일치 않은 소결이 되는 것이다.

증착모관으로 사용되는 실리카관으로부터 불순물의 확산을 막는 몇 층의 SiO_2 층을 입힌 후에 굴절률 조절을 위하여 중심부 부착을 수십 층하게 되며 입자 부착이 완결되었을 때 전체 증착층의 두께는 약 1mm 이내가 된다. 현재 많이 쓰이는 모관의 크기는 19mm×25mm이며 생산성 향상을 위하여 그 크기가 커지는 경향이 있으며 따라서 총 증착층 두께도 증가되어야 할 것이다. 증착이 끝난 후 원관을 수축시켜 원봉 형태로 만드는 과정을 수축이라 한다. 수축은 토치의 온도를 2000~2300℃로 높

이며 토치의 이동속도를 낮추어 몇 번의 연속적인 왕복이동으로 원봉 형태의 광섬유 모재를 만드는 과정이다. 그 메카니즘은 표면장력과 원관 내부와 외부의 압력차가 유발하는 중심부로 향하는 점성유동으로 인한 수축이다. 일반적으로 표면장력이 압력차보다 훨씬 크며 토치의 분사로 인한 정제 압력과 내부 유동장이 결정하여 주는 내부압력과와 차이는 수축과정의 안정도에 큰 영향을 미치게 된다. 수축과정에서 질적으로 중요한 관건은 완성된 모재의 단면적을 얼마나 원에 가깝게 만들 수 있느냐에 달려 있다. 따라서 초기 원관에 존재하는 타원도가 수축과정 중 증가하는지 아니면 감소하는지가 안정도 해석에 근거가 되며 압력차가 중요한 인자인 것이다. 일반적으로 단일 모드인 경우 중심부의 GeO_2 의 부착량이 다중모드에 비하여 적기 때문에 점성이 비교적 균일하며 타원도의 문제가 적으나 다중모드인 경우 중심부와 바깥부분의 점성차이가 심하여 타원도의 증가가 쉽게 된다. 따라서 실제 공정에서 내부압력을 조절하여 외부압력보다 높이는 방법으로 타원도를 최소화하고 있다. 수축과정 중 또한 문제가 되는 것은 높은 온도로 인하여 중심부에 부착된 GeO_2 가 증발하여 원하는 굴절률 분포를 얻을 수 없다는 점이다. 이는 위에 설명한 GeO_2 의 생성에 관련된 화학 평형식에서 쉽게 알 수 있듯이 온도가 올라갈 때 평형상수 값이 작아지며 따라서 반응 방향이 왼쪽으로 향한다는 사실로부터 이해되어 질 수 있다. 증발되는 GeO_2 를 보상하기 위하여 수축과정 중에 $GeCl_4$ 를 흘려 보내어 다시 GeO_2 를 생성하여 부착하기도 한다.

완성된 모재는 약 1~2cm 직경의 원봉 형태로서 광섬유가 가져야 할 굴절률 분포를 가지고 있다. 이 모재를 저항로나 zirconia RF 유도도로에서 인발하여 표준 직경 $125\mu m$ 의 광섬유를 뽑아내게 된다. 인발과정 역시 열전달과 유체유동 해석이 최적화를 위하여 중요하며 특히 인발 속도의 증가를 위하여서는 열응력으로 인한 잔류응력의 해석이 보충되어야 한다. 인

발과 동시에 코팅을 하게 되는데 가압 폴리머 코팅과 최근의 심해 통신용에 이용되는 탄소 Hermetic 코팅 등이 사용되며 과정 중에 발생하는 기포의 방지, 또한 불균일한 코팅 등을 최소화하기 위하여 열유체공학적 해석이 필요하다.

둘째로 OVD 과정은 크게 세 가지의 공정으로 나눌 수 있는데 그 첫번째가 입자 부착이다. 그림 2에 나와 있는 바와 같이 버너를 통해 연료와 산소 그리고 $SiCl_4$, $GeCl_4$ 등의 화학물질을 분사하고 버너 앞 부분에서 혼합 가스의 온도가 상승하여 화학 반응이 일어나며 이때 SiO_2 나 GeO_2 와 같은 입자가 발생되며 이 입자들이 가스와 함께 움직이다 부착봉(target rod)에 달라 붙게 된다. MCVD에서와 마찬가지로 입자부착 메카니즘은 thermophoresis이므로 증착 성능을 파악하기 위하여서는 온도장 및 유동장의 해석이 중요하다. MCVD와 달리 연료의 연소와 함께 화학 물질의 화학 반응이 일어나므로 부산물로 H_2O 가 발생되고 입자 부착 층에 함유하게 되며 이의 제거가 필수적이다. 전체 가스 유량 중 1ppm의 H_2O 의 양은 중량비로 약 1 ppb의 Si-OH를 형성시켜

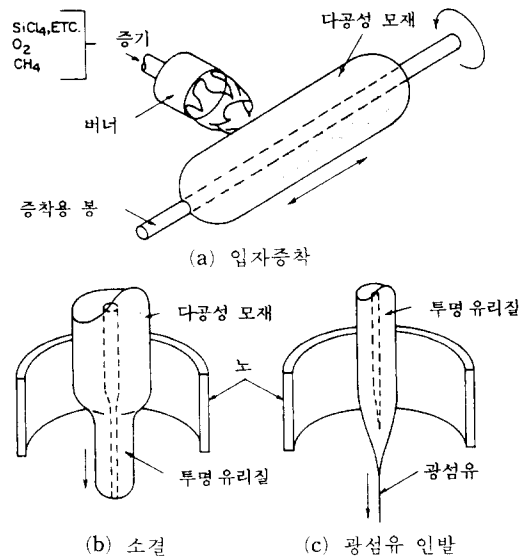
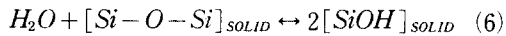
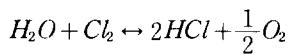


그림 2 OVD 공정단계

1.39 μm 의 파장대에서 약 0.04dB/km의 흡수 손실을 유발시키는 것으로 알려져 있다. 굴절률 조절을 위하여 MCVD와 달리 먼저 소량의 GeO_2 가 첨가된 중심부분을 부착하고 나중에 바깥부분(clad)을 부착하게 된다. 원하는 두께만큼 부착을 시킨 후 부착봉을 제거하고 건조와 소결 과정을 하게 된다. 부착봉이 빠진 다음이므로 건조가스를 다공성 모재의 중앙으로 불어 넣을 수 있으며 따라서 중앙 부근의 OH기의 함유를 줄일 수 있다. 광섬유의 주된 손실은 모재제조시 함유된 OH기가, SiO_2 가 최저 흡수 손실을 나타내어 광신호의 적정 파장대 근처인 약 1.25 μm 와 1.39 μm 파장대의 광자를 흡수함으로 인한 결과이므로 OVD과정에서의 건조과정은 광섬유의 질을 결정하는 중요한 과정이다. MCVD에서도 수축과정 때 OH기의 감소를 위하여 Cl_2 가스를 흘려 보내게 된다. Cl_2 가스가 OH기의 감소에 도움을 주는 원인은 다음과 같은 열역학적인 평형 식으로부터 알 수 있다.



즉 Cl_2 의 분압을 높임으로써 HCl을 만드는 방향으로 화학반응을 진행시켜 부착 층에 함유되는 반응을 억제하는 것이며 Walker의 논문⁽⁹⁾에서 보인 $C_{\text{SiOH}} \propto [P_{\text{H}_2\text{O}}]^{1/4} / [P_{\text{Cl}_2}]^{1/2}$ 과 같이 되며 MCVD 수축과정 때 Cl_2 가스의 사용이 가스가 없는 경우보다 약 4000배 정도로 OH함유를 줄일 수 있음이 밝혀졌다. 마찬가지로의 설명을 OVD 건조에 적용할 수 있을 것이다. 건조 과정 후 부분적으로 녹아붙은 다공성의 광섬유 모재를 소결 과정을 통하여 투명한 원봉모양의 모재로 만들며 마지막 과정으로 인발과 코팅 과정을 거쳐 광섬유를 제조하게 되며 이미 언급한 MCVD과정의 설명을 이 경우에도 적용할 수 있을 것이다. 증착률이 높은 것이 장점으로 약 9g/min 정도인 것으로 나타나며 증착 효율은 MCVD에 비하여 적은 것으로 알려져 있다.

VAD 방법은 위에 설명한 OVD와 마찬가지로 외부 증착 방법으로서 다른 점은 그림 3에서 볼 수 있듯이 VAD는 상승하는 원축의 아래 부분에서 입자 부착이 이루어지는 반면 OVD는 부착봉의 측면에 여러 층의 입자를 부착시킨다는 점이다. 입자 부착 메커니즘은 위의 경우와 같으며 MCVD에 비하여 유리한 점

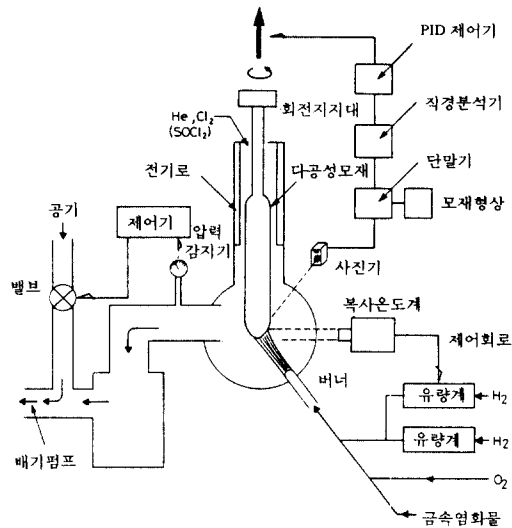


그림 3 (a) VAD 공정의 개략도

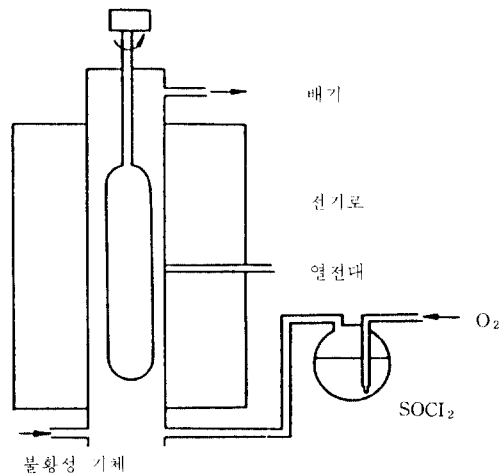


그림 3 (b) VAD 다공성 모재의 건조 및 소결

은 MCVD는 실리카 원관을 사용하므로 최종 제품인 광섬유의 질이 원관의 품질에 의지하나 OVD와 VAD는 증착되는 입자만을 가지고 만들기 때문에 품질 관리가 용이하다고 할 수 있다. 그러나 OVD와 마찬가지로 H₂O가 만들어져서 다공형의 광섬유 모재에 함유되므로 건조 과정이 필수적이며 이 경우 OVD와 달리 부착 붕이 없으므로 원관 형태가 아니고 원봉형태의 모재를 건조하여야 하며 이 때문에 그림 4와 같이 OH함유 분포가 OVD와 다르게 된다. VAD 방법에 있어서 중요한 것은 토치의 설계이며 원형 및 사각형의 토치 등이 시도되었다. 10개의 동심원을 갖는 실리카관으로 형성된 토치가 성공적으로 사용되었으며 중앙부분에서 화학물질이 분사되고 그 주위로 불완전 화학 반응을 방지하기 위한 Ar 등의 불활성가스를 주입하여 그 바깥으로 연료인 산소와 수소를 분사하게 된다. VAD방법의 중요한 문제는 굴절률 분포를 어떻게 얻느냐에 있으며 입자 성장층의 온도 분포의 조절로 GeO₂의 농도조절이 가능하여 이를 해결하고 있다. 증착물의 중심부는 약 2~3g/min이며 클래드(clad)부분은 약 10g/min⁽¹⁾으로 높으며 크기가 큰 모재 제조가 가능하여 생산성이 높다. 예를 들면 MCVD인 경우 하나의 모재에서 생산할 수 있는 광섬유의 길이가 15~30km이나 VAD는 100km 이상이 가능하며 바깥 부분의 실리카관을 덧붙이는 Rod in Tube 방식을 사용하면 생

산량이 더욱 늘어난다. 질적인 면에서 흡수 손실을 살펴보면 위의 세 가지 방법이 거의 같은 수준을 보이고 있다.

독일의 Philips 연구소에서 개발된 PCVD는 2.45 GHz의 마이크로 파 플라즈마를 이용하여 화학반응을 유도하며 반응으로 인해 생성된 원자들의 확산과정(diffusion)으로 실리카 원관 내벽에 유리박막을 성장시킨다. 입자가 형성되지 않고 마이크로 웨이브 캐비티를 빠른 속도로 왕복 이동시킬 수 있어서 부착층의 두께가 매우 작고 수백층을 증착시킬 수 있어서 굴절률 분포가 고르게 되어 산란 효과를 줄일 수 있으며 100%에 달하는 증착효율을 가지고 있다. MCVD와 같이 원관의 내벽에 증착시키므로 수축과정이 필요하며 MCVD공정과 동일하다.

3. 증착 성능 해석

광섬유의 질을 높이고 생산단가를 줄이기 위한 최적 운전조건을 찾는 데 있어서 화학증착 과정의 정확한 이해는 필수적이다. 화학증착(CVD)과정에서 광섬유의 질을 결정지어주는 것은 증착의 균일성 문제로서 원주방향의 균일성과 축방향의 균일성으로 나눌 수 있다. 원주방향의 균일성은 원관의 회전으로 어느 정도 해결되나 어떠한 회전속도에서 원주방향으로의 균일한 증착을 얻을 수 있는지를 파악하는 것이 중요하며 또한 축방향의 균일성 문제는 토치의 이동 시작 지점인, 실리카의 한 쪽 끝에서의 경사진 부착구간(즉 약 10cm 가량의 축방향으로의 불균일한 증착 구간)를 발생시키므로 어떠한 조건에서 경사진 부착구간 길이를 줄일 수 있는지를 알아야 할 것이다. 또한 광섬유의 생산단가를 절감하기 위하여서는 증착물의 향상으로 전체 공정시간을 줄이고 증착효율을 높여 고가의 화학물질을 절약하여야 한다. 그러므로 고 증착률과 고 증착효율을 나타내주는 증착조건을 찾는 것이 중요하며 여러 공정 인자들의 변화에 따른 증착성능을 해석하

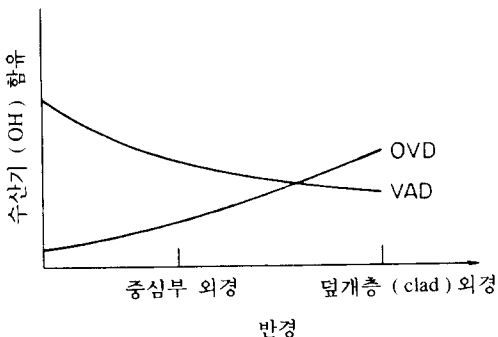


그림 4 OVD와 VAD 공정의 반경 방향 수산기(OH) 구배

는 것이 선행되어야 한다. 따라서 본 절에서는 화학증착과정에서 여러공정 인자 즉 토치 (torch) 속도, 회전속도, 유량, 토치 가열 분포 등이 증착의 균일성과 증착성능 즉 증착물과 증착효율에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 검토한다.

그림 5(a)는 MCVD원관 내의 등온선을 보여주며 이동하는 토치의 후방의 벽온도가 원관 내의 혼합가스 온도보다 높으며 토치의 전방에서는 이의 반대가 됨을 알 수 있다. 혼합가스의 온도가 약 1300°C가 되는 구간에서 화학 반응이 일어나며 이때 SiO₂나 GeO₂와 같은 입자가 발생된다. 그림에서 볼 수 있듯이 토치의

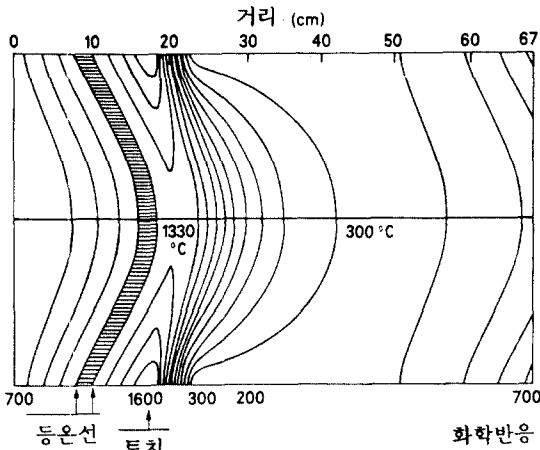


그림 5 (a) 토치의 위치를 기준으로 한 MCVD 모재 원관의 온도분포 (Walker 등⁽¹¹⁾)

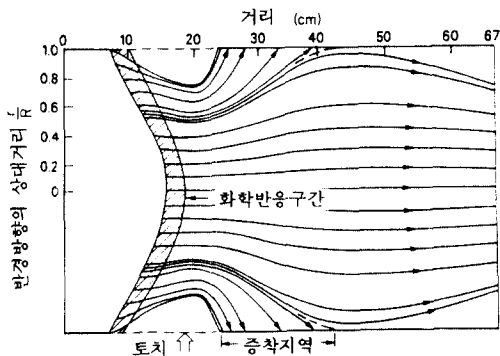


그림 5 (b) 온도구배에 의한 입자의 제적 (Walker 등⁽¹¹⁾)

후방에서 생성된다. 생성된 입자는 마이크로 이하 크기이고 발생된 지점에서는 온도 구배의 반대 방향 즉 원관의 벽에서 중심부로 이동하며 유체의 유동과 함께 토치의 전방부로 전달됨과 동시에 가스의 온도가 내벽의 온도보다 높으므로 원관 내벽 쪽으로 방향을 전환하여 이동되다가 내벽에 달라붙게 되며 뒤이어 토치가 부착된 지점을 지나면서 가열되어 소결과정으로 녹아붙게 된다. 그림 5(b)는 MCVD에서 볼 수 있는 입자의 제적을 보여준다. 그림 5의 결과들은 부력을 무시한 경우이므로 중앙선을 기준으로 하여 대칭의 결과를 보여주고 있으나 부력의 영향과 토치의 국소적 가열 효과 및 원관의 회전 등을 고려하면 그림 6과 같은 비대칭의 온도 분포를 얻게 되며 이 비대칭 효과가 입자 부착의 원주 방향으로의 불균일한 증착의 원인이 된다.⁽¹⁰⁾ 그림 6은 $\Omega = 60\text{rpm}$ 일 때 수평원관의 중심을 지나는 수직 평면상의 등온선을 보여주며 부력의 영향으로 비대칭임을 알 수 있고 토치의 뒷부분 즉 $\xi < 0$ 일 때 벽면의 온도가 가스의 온도보다 높아 부력으로 인한 2차 유동이 벽면을 따라 상승하고 중심부에서 하강하는 형태를 가지고 토치의 앞부분 $\xi > 0$ 에서는 벽면의 온도보다 가스의 온도가 높아지므로 반대 방향의 2차 유동을 가지게 된다.⁽¹¹⁾ 그림 6에서 굵은 선으로 표시한 부분이 화학 반응 등온선이고 입자의 생성 지점을 표시한다. 이 경우에는 입자의 생성이 벽면 근처에 한정됨을 알 수 있다. 유동조건과 원관의 크기에 따라 화학반응의 범위가 중심부까지 확장될

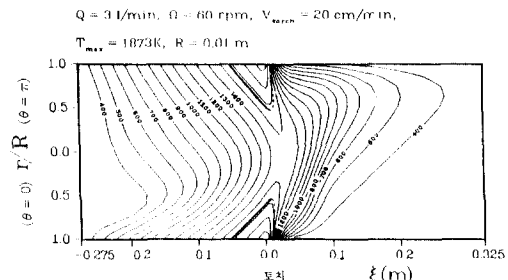


그림 6 수직단면에서의 등온선

수 있다. 입자의 3차원적 궤적은 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 복잡한 양상을 보이며 원관 내벽 근처에서 형성된 입자들은 대부분 부착되나 중심부 근처에서 형성된 입자들은 원관의 외부로 방출된다. 원관의 회전 때문에 실제 입자는 그림 7과 같이 나선모양을 그리며 원관 내벽에 부착되며 축방향과 원주방향의 부착지점으로부터 증착 성능에 관한 정보를 얻을 수 있다.

그림 8에 생성된 입자 중에서 외부로 방출된 입자와 부착된 입자를 표시하였다. 토치의 앞부분의 표면 근처에서 반경방향의 thermophoretic 속도는 유체의 축방향 속도보다 크게

되므로 입자들이 쉽게 벽면으로 이동하나 원관의 중심부에서는 유체의 축방향속도가 thermophoretic 속도보다 훨씬 크게 되므로 대부분 외부로 손실되는 것이다. 그림 8의 경우 약 55% (질량기준)의 SiCl_4 가 산화되어 SiO_2 가 생성되며 그중 83% 정도가 원관내에 부착되어 전체 증착효율 E_T 는 약 46% 정도이다.

그림 9는 여러 다른 조건에서 증착 효율 E_T 를 보여주며 $Q=1$ l/min인 경우와 $T_{max}=1973\text{K}$ 인 경우가 효율이 높게 나타나며 그 원인은 화학반응이 원관의 중심부까지 일어나 입자생성률이 100%에 달하기 때문이다. 그러나 그림에서 볼 수 있듯이 경사진 부착구간 길이가 커지게 되어 실제 공정에서는 이 부분을 제거해야 하는 단점이 있다. 그림 10은 토치가

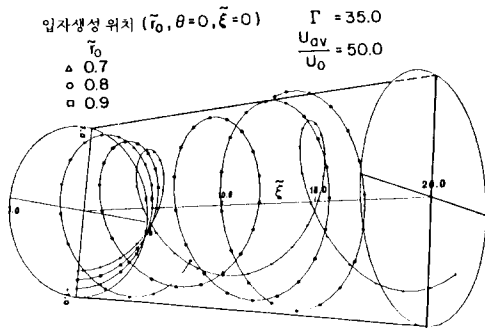


그림 7 3차원 입자궤적 $\lambda=0.5$ $Pe=1.0$ $H_M=3.0$

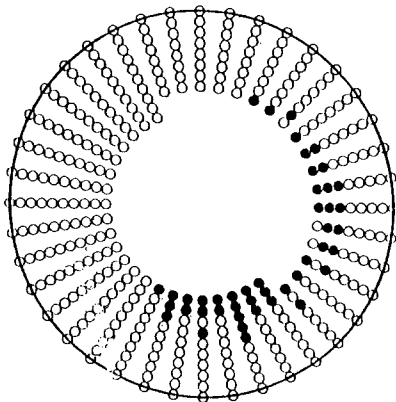


그림 8 초기 입자형성 위치
 * 원관 밖으로 배출되는 입자들을 흑색으로 표시
 * $Q=31/\text{min}$, $\Omega=60\text{rpm}$, $V_{Torch}=20\text{cm}/\text{min}$,
 $T_{max}=1873\text{K}$, $R=0.01\text{m}$

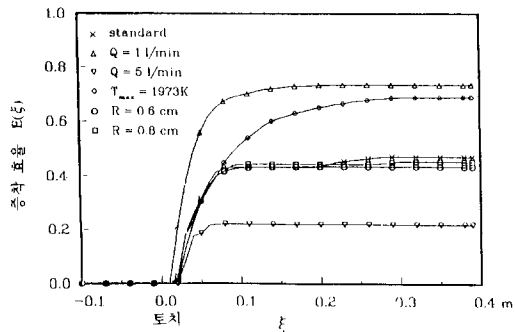


그림 9 여러가지 조건에 대한 증착효율 $E(\xi)$

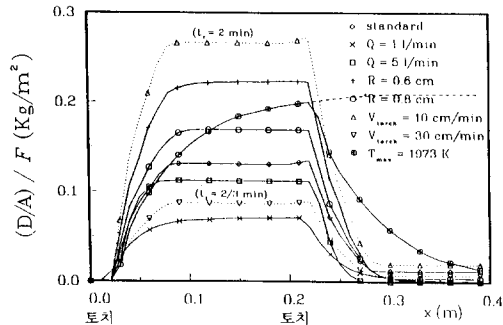


그림 10 축방향 증착 곡선 (원주방향으로는 일정)
 * $V_{\text{토치}}=10, 20, 30\text{cm}/\text{min}$, $t_f=2, 1, 2/3$ min일 때 (토치는 $x=0$ 에서 0.2m 까지 운동)

일분간 이동할 때 일어난 증착량의 축방향의 변화를 보여준다. 주어진 값은 원주 방향으로 는 적분된 양이다. 토치속도가 지정되지 않은 경우는 $V_{torch}=20\text{cm/min}$ 이며 일분 후에는 $x=0.2\text{m}$ 에 토치가 위치한다. 토치의 바로 앞부 터 약 10cm까지 증착량이 증가하다가 일정한 값에 도달하게 된다. 이 초기의 상승하는 부분이 경사진 부착구간을 나타내며 $T_{max}=1973\text{K}$

인 경우 높은 증착 효율을 가지나 20cm 이상 의 긴 경사진 부착구간 길이가 예상된다. $Q=51/\text{min}$ 인 경우 E_r 는 적은 값을 지나 유입 량이 크므로 일분간 증착된 질량은 $Q=11/\text{min}$ 일 때보다 커지게 되나 $Q=31/\text{min}$ 의 경우 보다는 적게 된다.

광섬유 제조공정에서는 입자의 균일한 증착 이 중요하며 수평원관의 경우 부력이 비축대칭 의 온도분포를 만들어 원주방향으로 균일하지 않는 증착의 원인이 되며 원관의 회전이 이의 효과를 상쇄시킨다. 그림 11에서는 원주 방 향으로의 증착의 변화를 여러 다른 회전속도에 따라 나타내었으며 $\Omega=60\text{rpm}$ 일 때부터 비교적 균일한 증착을 나타내며 Ω 가 증가할수록 균일도가 높아진다. 수직원관의 경우 유동과 부력 방향이 평행하며 링 토치를 사용하면 축 대칭의 온도와 유동 분포를 얻게 되어 원주방 향으로 균일한 증착을 기대할 수 있다. 그림 12와 그림 13은 MCVD 수직원관 안에서 중력과 반대방향을 같은 유동(upward flow)과 같

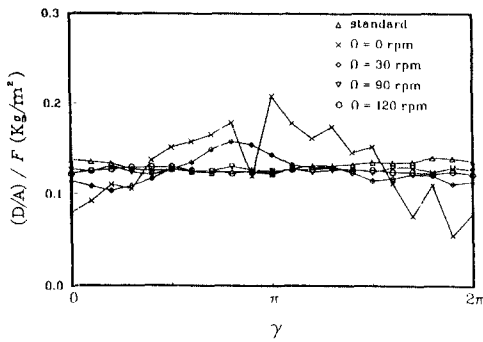
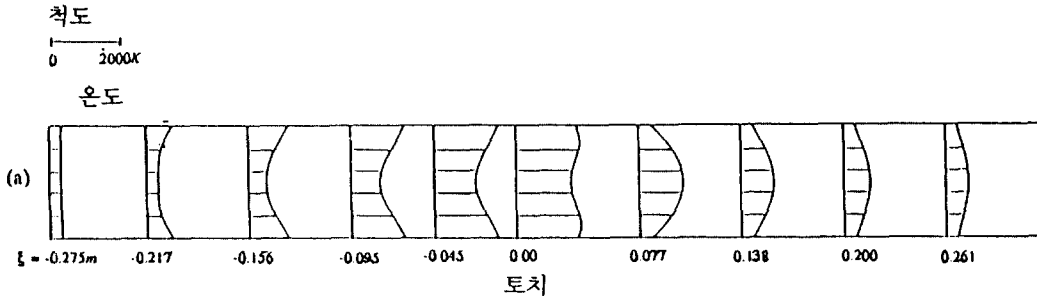


그림 11 $x=0.18\text{m}$ 에서의 원주방향 증착분포



(a) 상향 유동의 경우 단면에서의 온도분포

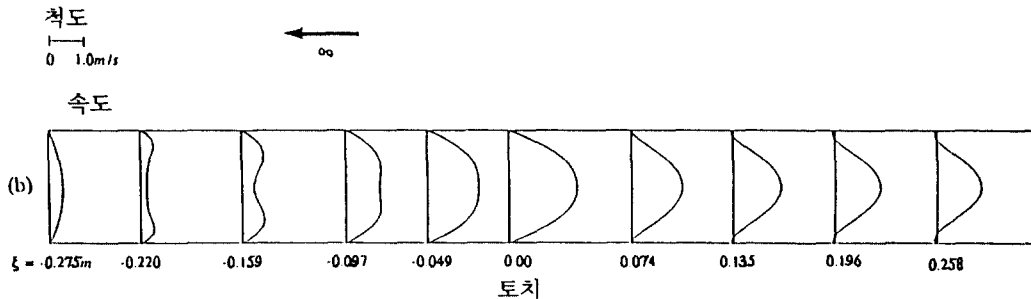


그림 12 (b) 상향 유동의 경우 단면에서의 축방향속도분포

* $Q=31/\text{min}$, $R=0.01\text{m}$ $V_{torch}=20\text{cm/min}$ $T_{max}=1873\text{K}$

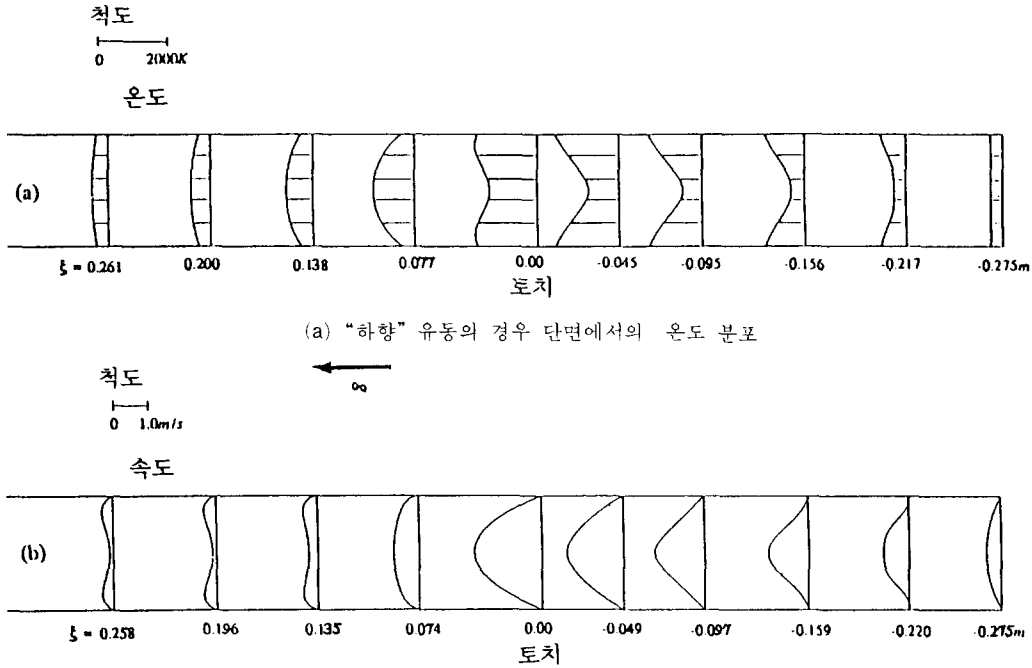


그림 13 (b) “하향” 유동의 경우 단면에서의 축방향속도 분포
 * $Q=31/\text{min}$ $R=0.01\text{m}$, $V_{\text{toron}}=20\text{cm}/\text{min}$, $T_{\text{max}}=1873\text{K}$

은 방향을 갖는 유동(downward flow)의 온도 및 유동장 결과를 나타내고 있다. 그림 12(b)에서 볼 수 있듯이 토치의 뒷부분에서는 벽면 근처에서 부력으로 인한 이차유동이 주유동과 같은 방향이고 중심부에는 그 반대여서 중심부의 속도가 지연되어 토치의 가열이 보다 중심부 근처에 전달되어 화학반응구간이 넓어지게 되어 입자생성률이 높아진다. 토치의 전방에는 이차유동이 중심부의 주유동을 가속시키며 벽면 근처 유동을 지연시켜 반경 방향의 이차유동이 중심부로 향하게 되어 thermophoretic 증착을 방해하여 경사진 부착구간을 크게 한다. $\xi=0.196\text{m}$ 일 때 벽면 근처에서 역유동을 볼 수 있다. 그림 13은 하향류를 나타내며 토치의 후방 주유동이 부력의 영향으로 가속되어 화학반응온도구간이 벽면근처에 머물러 입자형성률이 26%에 머물게 된다. 토치의 전방에서는 반경방향의 이차유동이 벽쪽으로 향하게 되어 증착을 도와주어 부착길이를 감소시킨다.

Walker 등⁽¹²⁾은 실험적으로 구한 증착효율을 근사적으로 다음과 같이 나타내었다.

$$E=0.8(1-T_e/T_{rxn}) \quad (7)$$

이식은 입자의 생성률이 높아 입자부착이 입자 전달(particle transport)에 의해 결정될 경우에 적용할 수 있다. 입자생성률이 작은 경우 즉 화학 반응이 원 내벽에 한정된 경우는 입자생성률이 총 증착 효율을 지배할 것이다. 식 (7)에서 T_{rxn} 은 화학 반응 온도이고 T_e 는 원관과 가스가 평형을 이루는 온도이다. 여기서 T_e 는 토치의 첫번 이동에서는 대기온도와 같을 것이며 토치의 왕복 이동으로 인하여 얻어지는 토치 전방의 원관 벽의 최소온도를 의미한다. T_e 를 모델링으로 구하기 위하여서는 원관의 고체층에서의 열전도를 포함한 원관 내의 열 유체 유동을 해석하여야 하며 토치의 반복적인 가열효과가 포함되어야 한다.

OVD공정의 증착률은 다공형의 입자 부착

원통의 직경과 연료-가스 유량에 크게 의지하게 된다. 즉 그림 14에서 볼 수 있는 바와 같이 직경이 커질수록 증착률이 커지며 또한 연료-가스의 유량이 커질수록 증착률이 커짐을 알 수 있다. 직경이 커질수록 입자가 원통에 부착될 면적이 커지게 되며 또한 원통의 평균

온도가 낮아지므로 thermophoretic force가 커져서 단위시간 당 증착률이 증가하는 것이다. Bautista 등⁽¹⁴⁾의 최근 모델링에서 임계넓이를 식 (8)과 같이 정의하였다.

$$W_{crit} = \left[\frac{2Rv}{V_{\infty}} \right]^{1/2} J_T \quad (8)$$

식(8)은 가우시안 입자 분포에서 부착되는 입자 분포의 구간을 표시한 것으로 R 이 커질 때 \sqrt{R} 에 비례하여 커지므로 증착률이 증가함을 보여준다. 또한 부착봉에 대한 토치의 상대적인 위치에 증착효율이 민감하게 변함을 보여주었으며 약 1mm어긋나 있을 때 효율이 거의 반으로 줄어듦을 실험적으로 그리고 모델링을 통하여 확인하였다.

VAD공정에서도 thermophoretic 입자운동이 증착성능을 결정지어 주며 토치와 증착원관이 이루는 각도가 증착 속도에 큰 영향이 있으며 약 40° 근방에서 최대 증착 속도를 보여주고 있다. 또한 분사노즐의 간격과 분사속도를 기준으로 한 레이놀즈 수와 $SiCl_4$ 의 유량이 증착률에 큰 영향을 미치며 그림 15에서 볼 수 있듯이 적정 레이놀즈 수가 존재하며 약 30 정도이다. 레이놀즈 수의 증가에 따라 온도 구배가 커져서 thermophoretic force가 커지므로 증착률이 높아지며 슈리렌 사진으로 검증한 바와 같이 레이놀즈 수가 30 이상일 때 생기는 와류의 영향으로 증착률이 감소되는 것으로 생각된다.

4. 맺음말

전광 통신의 시대를 맞이하면서 광섬유의 수요가 급증하고 있어 보다 질 좋고 생산 단가가 절감된 광섬유의 제조가 중요하며 이것은 기존 기술의 최적화와 새로운 제조기술의 개발에 의하여만 가능할 것이다. 생산성 및 광섬유의 질이 화학증착을 비롯한 각 공정에 의지하므로 각 공정의 최적화가 중요하며 광섬유 제조 화학증착과정에서 증착 성능은 thermophoresis 로써 결정지어지는 입자운동 및 부착에 의지하

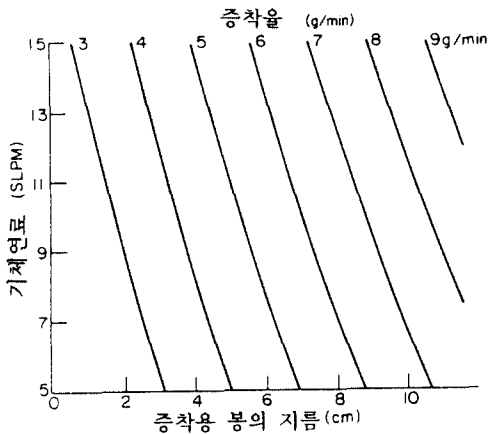


그림 14 증착용 봉의 지름과 기체연료의 유량에 따른 OVD 공정의 증착률(L_i ⁽¹³⁾)

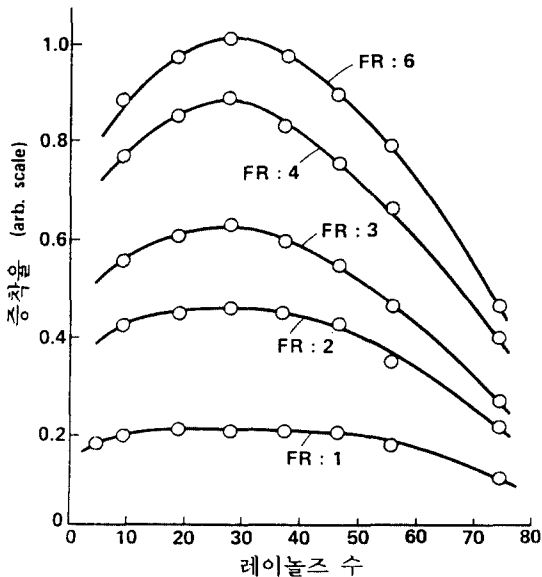


그림 15 레이놀즈 수에 따른 미소유리 입자의 증착률의 변화
* FR : $SiCl_4$ 의 상대적인 유량(L_i ⁽¹³⁾)

므로 향상된 증착 성능을 얻기 위하여서는 각 과정에서의 열전달, 유체유동 및 입자 부착 해석이 선행되어야 한다. 증착의 균일성, 증착 효율 및 증착물의 향상을 위한 노력은 모델링을 포함한 실험적 연구 및 새로운 기술의 개발 및 시도가 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Keck, D.B. and Morrow, A.J., 1989, "Low-Cost Fiber Fabrication," Phil. Trans. R.Soc. Lond. A 329, pp. 71~81.
- (2) Noda, J., Okamoto, K. and Sasaki, Y., 1986, "Polarization Maintaining Fibers and Their Applications," J. Lightwave Technology, Vol. LT-4, pp. 1071~1089.
- (3) Ainslie, B.J., 1991, "A Review of the Fabrication and Properties of Erbium Doped Fibers for Optical Amplifiers," J. Lightwave Technology, Vol.9, pp.220~227.
- (4) Nagel, S.R., MacChesney, J.B. and Walker, K.L., 1982, "An Overview of Modified Chemical Vapor Deposition Process and Performance," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, No.4 pp. 459~476.
- (5) Blankenship, M.G. and Deneka, C.W., 1982, "The Outside Vapor Deposition Method of Fabricating Optical Waveguide Fibers," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, No.10, pp. 1418~1423.
- (6) Inada, K., 1982, "Recent Progress on Fiber Fabrication Techniques by Vapor Phase Axial Deposition," IEEE J. Quantum Electronics, Vol. QE-18, No. 10, pp. 1424~1431.
- (7) Lydtin, H., 1986, "PCVD : A Technique Suitable for Large-Scale Fabrication of Optical Fibers, J. of Lightwave Technology, Vol. LT-4, pp. 1034~1038.
- (8) Talbot, L., Cheng, R.K., Schefer, R.W. and Willis, D.R., 1980, "Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer," J. Fluid Mech., Vol. 101, pp. 737~758.
- (9) Walker, K.L., MacChesney, J.B. and Simpson, J.R., 1981, "Reduction of Hydroxyl Contamination in Optical Fiber Preforms," pp. 86~88 in Technical Digest of 3rd International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communications, San Francisco.
- (10) Lin, Y.T., 최만수, Greif, R., 1991, "수정된 화학증착법(MCVD)에서 입자 Deposition에 관한 삼차원 해석," 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집(Ⅱ), pp. 185~187.
- (11) Walker, K.L., Geyling, F.T. and Nagel, S.R., 1980, "Thermophoretic Deposition of Small Particles in the MCVD Process," J. Am. Ceram. Soc., 63, pp. 552~558.
- (12) Li, T., 1985, "Optical Fiber Communications," Academic Press, New York.
- (13) Bautista, J.R., Walker, K.L. and Atkins, R.M., 1990, "Modeling Heat and Mass Transfer in Optical Waveguide Manufacture," Chemical Engineering Progress, Feb., pp. 47~52.