

원심력을 이용한 광통신용 광섬유 모재제조

— 미세입자 크기 및 이동식 injection tube의 영향 —

민 동 수* · 김 교 선** · 이 광 래***

Fabrication of Optical Fiber Preforms for Optical Communication by Centrifuge

— Effects of Fine Particle Sizes and Traversing Injection Tube —

Dong - Soo Min * · Kyo - Seon Kim ** · Kwang - Rae Lee ***

ABSTRACT

In this paper, the technique to fabricate the optical fiber preforms by centrifuge was investigated, using silica particles of different sizes. The injection tube was designed to traverse axially so that uniform coating of tiny silica particles onto the substrate tube can be certified. The deposition efficiencies and deposition rates of SiO_2 particles were measured to elucidate the effects of process variables such as rotation speed of rotor, aqueous flow rate, suspension concentration, binder concentration and overflow weir diameter. This study shows clearly the merit of this technique by enhancing abruptly the deposition rates and deposition efficiencies, comparing to the conventional processes for optical fiber preforms.

1. 서 론

기존의 구리를 통한 통신에서 광섬유를 주체로 이용하여 대용량의 통신을 할 수 있는 정보화 시대에 접어들었다. 광섬유를 이용한 통신은 구리를 이용한 통신에 비하여 전

송에 따른 손실이 작고 (<dB/km) 넓은 주파수에 적용할 수 있으며 (1~100GHz) 크기 및 무게가 작고 유연성과 안정성이 높으며 혼선의 가능성이 적은 장점을 지니고 있다. 또한 다른 전자기장에 영향을 받지 않으며 주원료로 쓰이는 실리카가 무한정한 자원으로 존재하고 있으며 화학적이거나 온도의 변화등에서 광섬유의 성능이 별로 변하지 않는 장점이 있다.^{1,2)} 현재 만들어지는 고질의 광섬유

* 강원대학교 공과대학 화학공학과 학생
** 강원대학교 공과대학 화학공학과 조교수
*** 강원대학교 공과대학 화학공학과 부교수

는 10마일 정도의 두께를 통과할 때의 광손실이 보통 창유리 1인치 정도 통과할 때의 광손실 보다 작게 나타난다.” 광섬유를 이루는 주 구성물질은 SiO_2 이며 굴절률 변화를 주기 위한 dopant로써 GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 또는 F 등이 이용된다. GeO_2 는 가장 많이 사용되는 dopant로 굴절률을 높여주며 B_2O_3 는 굴절률과 점도를 낮추어 주는 반면에 P_2O_5 는 굴절률을 높이고 점도를 급격히 낮추어서 drawing 등을 용이하게 하며 F는 SiO_2 의 굴절률을 낮추어 준다.“

광섬유는 보통 머리카락 한개 정도 굵기의 유리섬유로써 단면을 살펴보면 굴절률이 높은 물질로 채워진 중심부분 (core)과 core 주위의 비교적 굴절률이 낮은 물질로 이루어진 cladding, 그리고 cladding을 둘러싸는 피복 (coating)으로 나눌수 있다. 광섬유 내로 보내진 전자기파는 core와 cladding 사이의 굴절률 차이때문에 광섬유 내에서 전반사 되면서 광섬유를 통하여 전송된다.⁵⁾

광섬유 제조과정을 살펴보면 크게 3개의 공정으로 나눌수 있다. 첫째로 원하는 굴절률 분포를 갖는 유리통 상태의 preform을 제조하는 광섬유 모재 제조공정이고 둘째로 광섬유 모재를 고온으로 가열한 다음 잡아당김으로써 직경 $100\sim 200\mu\text{m}$ 정도의 크기로 뽑아내는 광섬유 모재의 drawing 공정이다. 마지막 단계인 플라스틱과 nylon에 의한 광섬유의 coating 공정을 거쳐서 광섬유가 제조된다.“⁶⁾

기존의 광섬유 모재 제조공정을 살펴보면 AT&T에서 개발한 개량화학 증착법 (Modified Chemical Vapor Deposition, MCVD), Corning Glass Works의 Outside Vapor Deposition (OVD), 일본의 NTT에서 개발된 Vapor Axial Deposition (VAD)이 많이 이용되는 공정으로 있으며 이밖에도 Plasma-enhanced Modified Chemical Vapor Deposition (PMCV) 등이 있다.“

MCVD 공정은 간단하고 공정제어가 쉽고

광섬유 제조에 요구되는 단계의 수가 적으며 굴절률 분포의 조절이 쉽다. OVD 공정은 증착속도가 빠르고 광섬유 모재의 크기를 크게 조절할 수 있으며 강도가 높은 광섬유를 제조할 수 있다. VAD 공정에서는 광섬유 모재를 연속 공정으로 생산할 수 있으며 증착효율이 높고 비교적 광손실이 작은 광섬유를 제조할 수 있다. PMCV 공정에서는 증착속도 및 증착효율을 최대화 할 수 있다.

지금까지 살펴본 기존의 광섬유 모재 제조공정의 공통적인 문제점으로 SiO_2 의 부착속도가 보통 $2\sim 3\text{g}/\text{min}$ 으로 낮아서 광섬유 생산속도에 제한을 크게 받고 있을 뿐만 아니라 SiO_2 의 부착효율이 $50\sim 60\%$ 로써 많은 양의 SiO_2 가 부착되지 않고 손실되어 경제적인 측면에서 문제시 되고 있다.

기존 공정에서의 문제점인 SiO_2 의 부착속도와 부착효율을 증가시키고 모재 크기를 증대시키기 위해 시도된 방안으로 낮은 농도의 SiO_2 suspension을 이용하면서 원심력에 의해 SiO_2 의 부착속도 및 부착효율을 증대시키는 기술을 제안하였다. 이 방법의 또 다른 장점으로는 균일한 혼합을 이룰수 있으며 SiO_2 입자들끼리 agglomeration이 형성되지 않으며 또한 점도가 낮기 때문에 bubble이 생성되지 않으면서 원심력에 의해 조밀하면서 균일한 coating을 이룰수 있다.

본 연구에서도 SiO_2 입자를 이용하여 실험하였고 SiO_2 입자로는 입자크기가 다른 Zeosil - 155 (평균직경 $40\mu\text{m}$)와 Zeosil - 55 (평균직경 $12\mu\text{m}$)를 각각 이용하였으며 기계적 강도를 높이고 건조시에 crack이 생기는 현상을 줄이기 위해 binder로 PVA를 사용하였다.

본 실험에서 광섬유 제조공정의 경제성에 많은 영향을 미치는 SiO_2 의 부착효율 및 부착속도를 측정하였다. 원심력을 이용한 광섬유 모재를 제조시에 부착효율 (X_{DE})은 다음 식으로 정의되었다.

$$X_{DE} = (C_o - C_a) / C_o$$

C_o 는 원래 수용액에서의 suspension의 농도이고 C_a 는 overflow weir를 넘어서 나온 수용액 중의 suspension 농도이다. 또한 부착속도(X_{DR})은 다음 식으로

$$X_{DR} = C_o Q X_{DE}$$

정의되며 이 식에서 Q 는 원심력 분리기에 가해지는 수용액의 부피 유량을 나타낸다. 원심력 분리기에서의 SiO_2 입자 부착효율 및 부착속도는 입자 크기, rotor의 회전수,

rotor의 직경 및 길이, 수용액 유량, suspension 농도, overflow weir 직경등의 여러 공정 변수의 영향을 받아서 증가 및 감소된다. 본 실험에서는 앞의 변수를 변화시키면서 원심분리기에서의 부착효율 및 부착속도를 측정하였으며 각 변수의 영향을 조사하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

원심력을 이용한 광섬유 모재 제조용 실험장치를 그림 1과 같이 제작하였다.

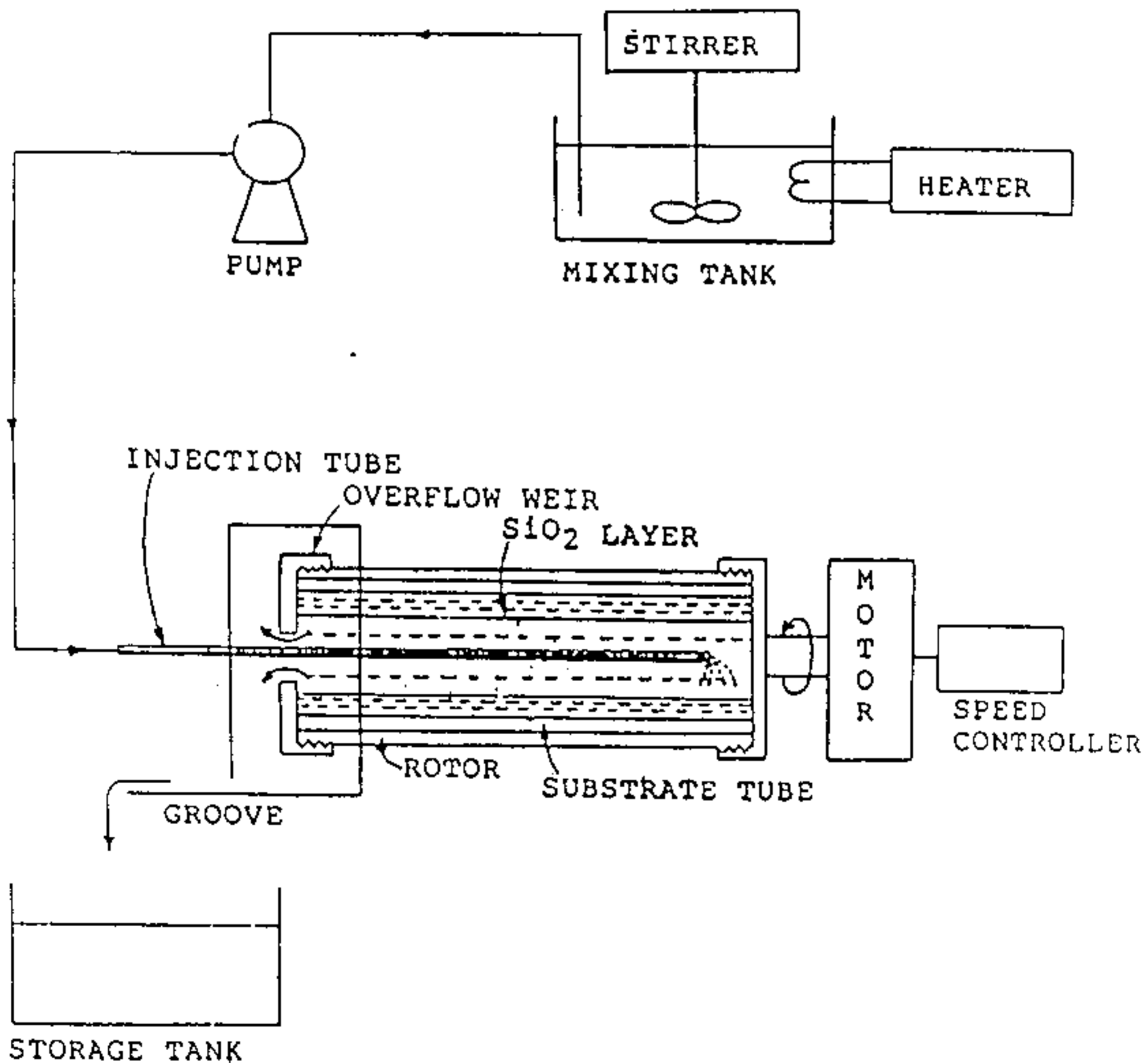


Fig. 1 Experimental apparatus to fabricate the optical fiber preform by centrifuge.

Zeosil - 155와 Zeosil - 55의 입자크기가 다른 SiO_2 를 PVA, 물과 함께 혼합조에 가하고 stirrer에 의해 기계적인 힘으로 교반하여 SiO_2 입자가 균일한 suspension 상태를 유지하도록 하였다. stirrer와 heater에 의해서 균일한 SiO_2 농도와 일정한 온도로 유지되는 혼합조내의 실리카 수용액을 peristaltic pump (Masterflex model no. 7520, Cole - Parmer Ins. Co)를 이용하여 혼합조에서 injection tube (외경 3mm, 길이 470mm, stainless tube)까지 수용액을 운송한 다음 injection tube를 통해 substrate tube의 안쪽으로 수용액을 공급하였다.

rotor는 speed controller로 회전수를 변화시킬 수 있는 motor에 연결되어 회전하도록 하였다. rotor의 재료로써 알루미늄 관을 사용함으로써 무게를 최소화 하여 motor에의 부하를 줄이도록 하였다. motor와 rotor의 연결 부위는 비교적 강한 재료인 stainless를 이용하였고 rotor와 stainless 사이에 나사선으로 연결하여 쉽게 분리 및 접합이 가능하도록 하였다. substrate tube로는 외경 30mm, 길이 190mm의 유리관을 사용하였고, substrate tube가 알루미늄관으로 만들어진 rotor의 안쪽에 장착되도록 하였다.

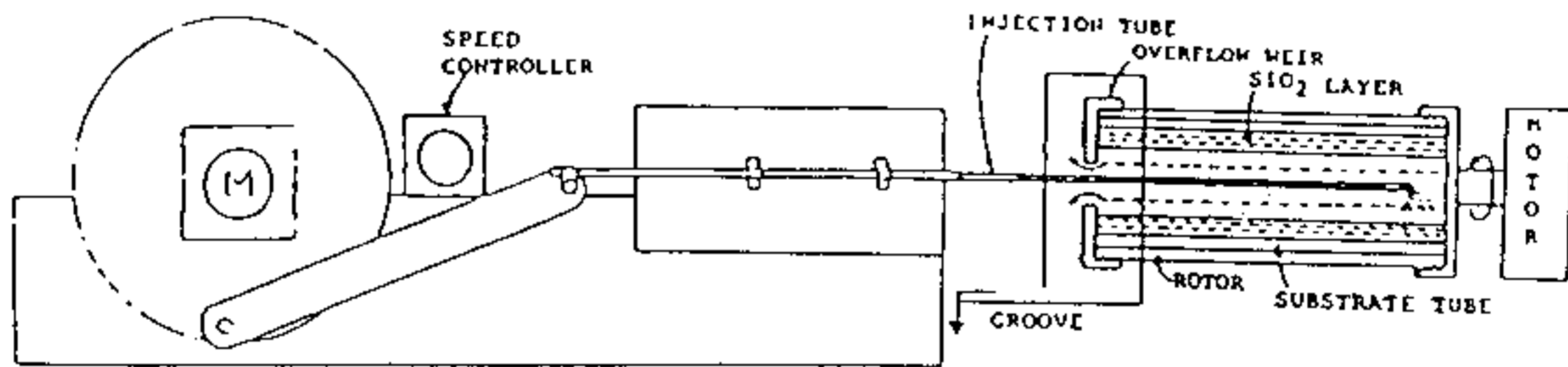


Fig. 2 Schematic of the traversing injection tube.

그림 2는 injection tube를 일정한 속도로 왕복시켜서 substrate tube내에 균일한 coating을 이룰수 있게 만든 장치이다. 모터를 이용하여 disk를 회전시키고 이러한 회전운동을 injection tube의 왕복운동으로 변환시켰다. 모터에 가해지는 전압차이를 이용하여 모터의 회전속도를 조절하는 조절기를 만들어서 injection tube의 왕복속도를 용이하게 조절할 수 있도록 하였다. injection tube를 5회/min정도 좌우로 이동시킴으로써 SiO_2 입자를 포함한 수용액을 substrate tube의 전체에 일정하게 공급할 수 있다. injection tube에서 흘러나온 수용액은 고속으로 회전하고 있는 substrate tube의 회전력에 의해 같이 회전운동을 하게 된다.

수용액 중에서 suspension 상태인 SiO_2 는 물을 따라 rotor의 축 방향으로 흘러가는 동시에 원심력에 의해 바깥쪽으로 움직여서 substrate tube의 안쪽 방향에 부착되고 나머지는 overflow weir를 넘어가는 물을 따라서 storage tank에 떨어지게 했다. 부착이 끝난 substrate tube를 rotor에서 분리하여 muffle furnace에서 건조시켜 H_2O 를 완전히 제거한 다음 무게를 측정하여 공급된 미세입자 Zeosil - 155와 Zeosil - 55의 양에 대하여 부착된 미세입자의 양을 측정하여 부착효율을 계산하였다. 또한 단위시간당 부착된 미세입자의 양을 계산하여 미세입자들의 부착속도를 구해냈다.

실험변수로서 rotor의 회전속도, sub-

strale tube로 수용액의 주입유량, overflow weir의 직경, SiO₂의 농도, PVA농도를 변화시키면서 입자크기가 다른 Zeosil-155 및 Zeosil-55에 대해서 각각 부착효율 및 부착속도를 실험하였다.

본 실험에서 조사한 실험변수의 종류와 실험변수의 범위는 아래와 같다.

Zeosil-155 농도 = 2~8wt%
 Zeosil-55 농도 = 2~8wt%
 PVA 농도 = 0.1~0.4wt%
 rotor의 회전속도 = 1500~5000rpm
 수용액의 주입유량 = 30~90g/min
 overflow weir 직경 = 0.9~1.5cm
 injection tube 왕복속도 = 5회/분
 작동시간 = 6분

3. 실험결과 분석 및 검토

광섬유 제조속도가 주로 광섬유 모재 제조속도에 의존하고 있어서 광섬유 모재 제조속도를 최대화 하는 것이 경제적인 관점에서 중요한 의미를 가지고 있으므로 각 입자크기에 따라 관찰하였다. 표준 실험조건을 기준으로 각 실험변수를 변화시키면서 이들이 부착속도에 미치는 영향을 관찰하였다.

그림 3은 rotor의 회전수를 변화시키면서 측정된 Zeosil-155(평균직경 40 μ m) 및 Zeosil-55(평균직경 12 μ m)의 부착 속도를 보여주고 있다. rotor의 회전수가 증가함에 따라 SiO₂ 입자의 부착에 필요한 원심력(= mrw^2 , m = 입자무게, r = rotor 반경, w = 회전각속도)이 증가하므로 부착속도가 증가하고 있다. 또한 입자 크기가 큰 Zeosil-155의 원심력이 크므로 부착 속도가 높게 나타나고 있다.

그림 4는 수용액의 주입유량을 증가시키면서의 부착속도 변화를 Zeosil-155와 Zeosil-55에 대해서 나타내고 있다. SiO₂ 유량이 증가할수록 부착 가능한 입자수가 증가하기 때문에 유량의 증가에 따라서 부착속도도 증가하고 있다. 여기서도 큰 입자

(Zeosil-155)의 부착속도가 높게 나타나고 있다.

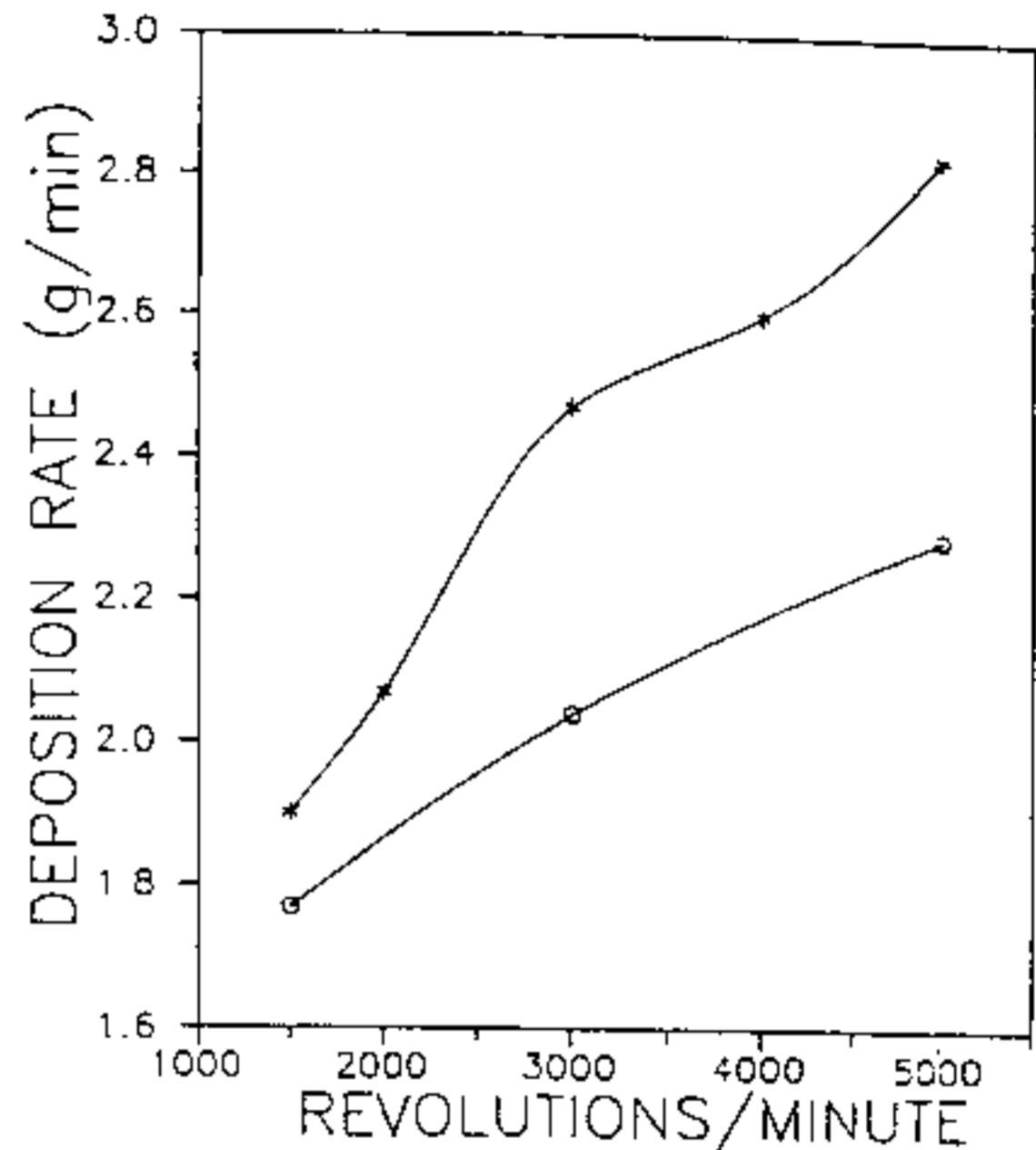


Fig. 3 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(o) as a function of rotation speed of rotor.

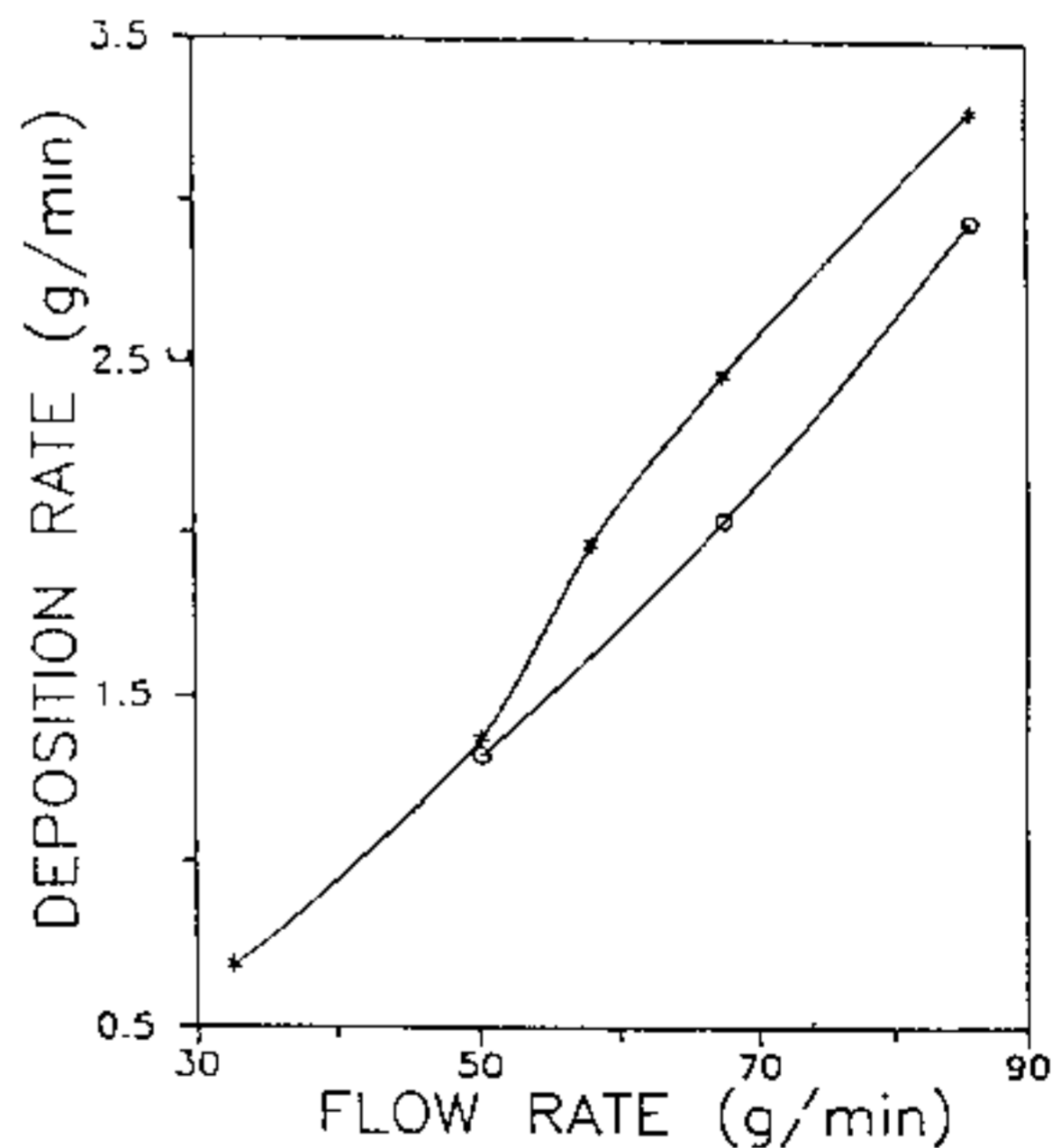


Fig. 4 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(o) as a function of aqueous flow rate.

그림 5는 SiO_2 의 농도 변화에 따른 부착속도의 변화를 각각 보여주고 있다. SiO_2 의 농도가 증가할수록 부착속도가 비례적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있는데 SiO_2 농도가 증가할수록 부착될 수 있는 SiO_2 입자의 수가 증가하기 때문이다.

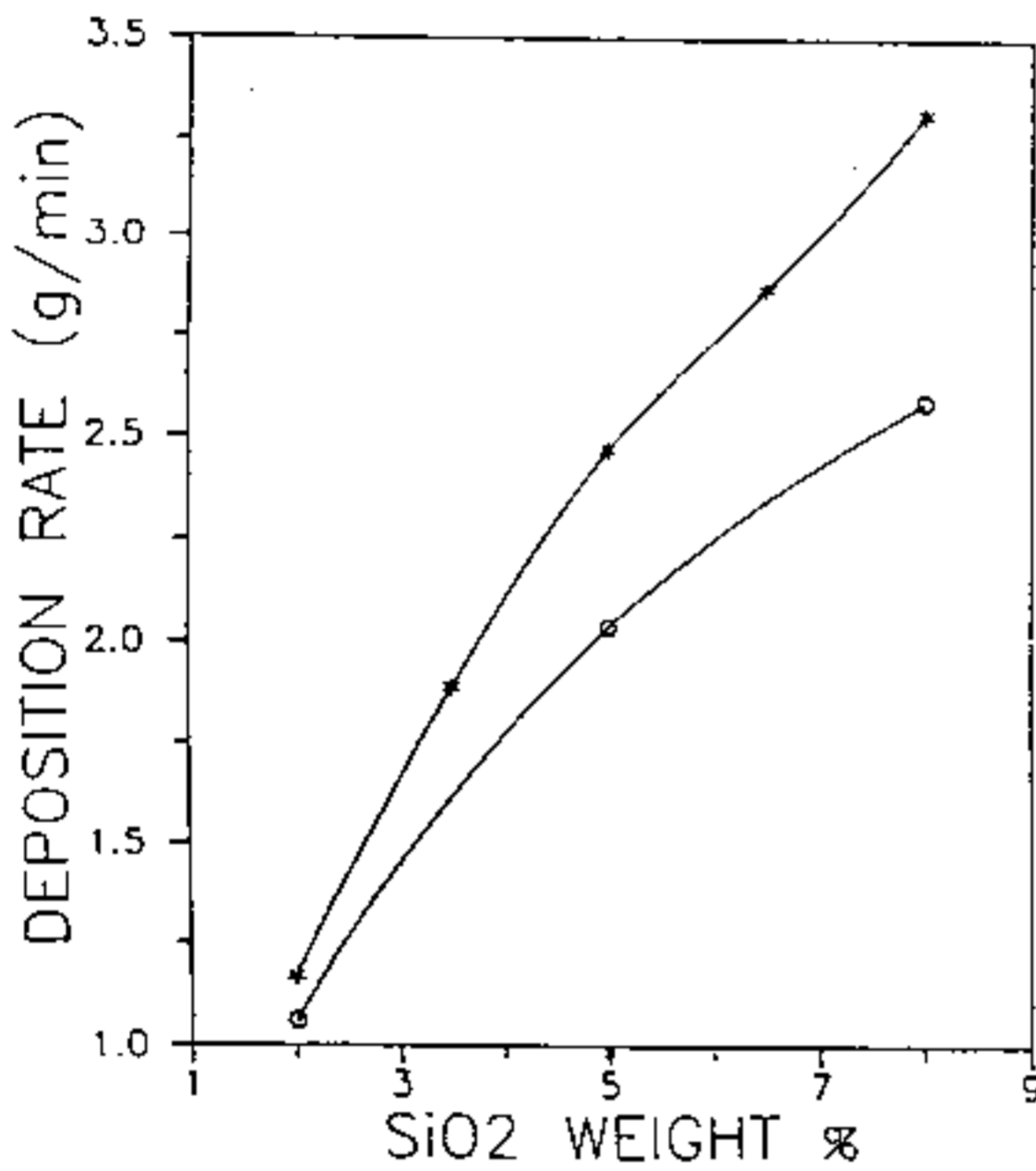


Fig. 5 Deposition rate of Zeosil - 155(*) and Zeosil - 55(○) as a function of suspension concentration.

그림 6은 binder로 이용하는 PVA의 농도를 변화시키면서 Zeosil - 155와 Zeosil - 55의 부착속도를 측정하였으며 PVA 농도가 증가할수록 SiO_2 입자가 substrate tube 표면에 더 견고하게 고정되므로 부착속도가 증가하게 된다.

overflow weir의 변화에 따른 SiO_2 의 부착속도 변화를 그림 7에서 보여주고 있다.

직경이 0.9cm, 1.2cm, 1.5cm인 overflow weir를 사용해 실험하였으며 직경이 큰 overflow weir를 사용할수록 rotor내에서 회전하고 있는 수용액의 두께가 얇아져서 수용액중의 SiO_2 입자가 쉽게 부착되는 것을 관찰할 수 있었다.

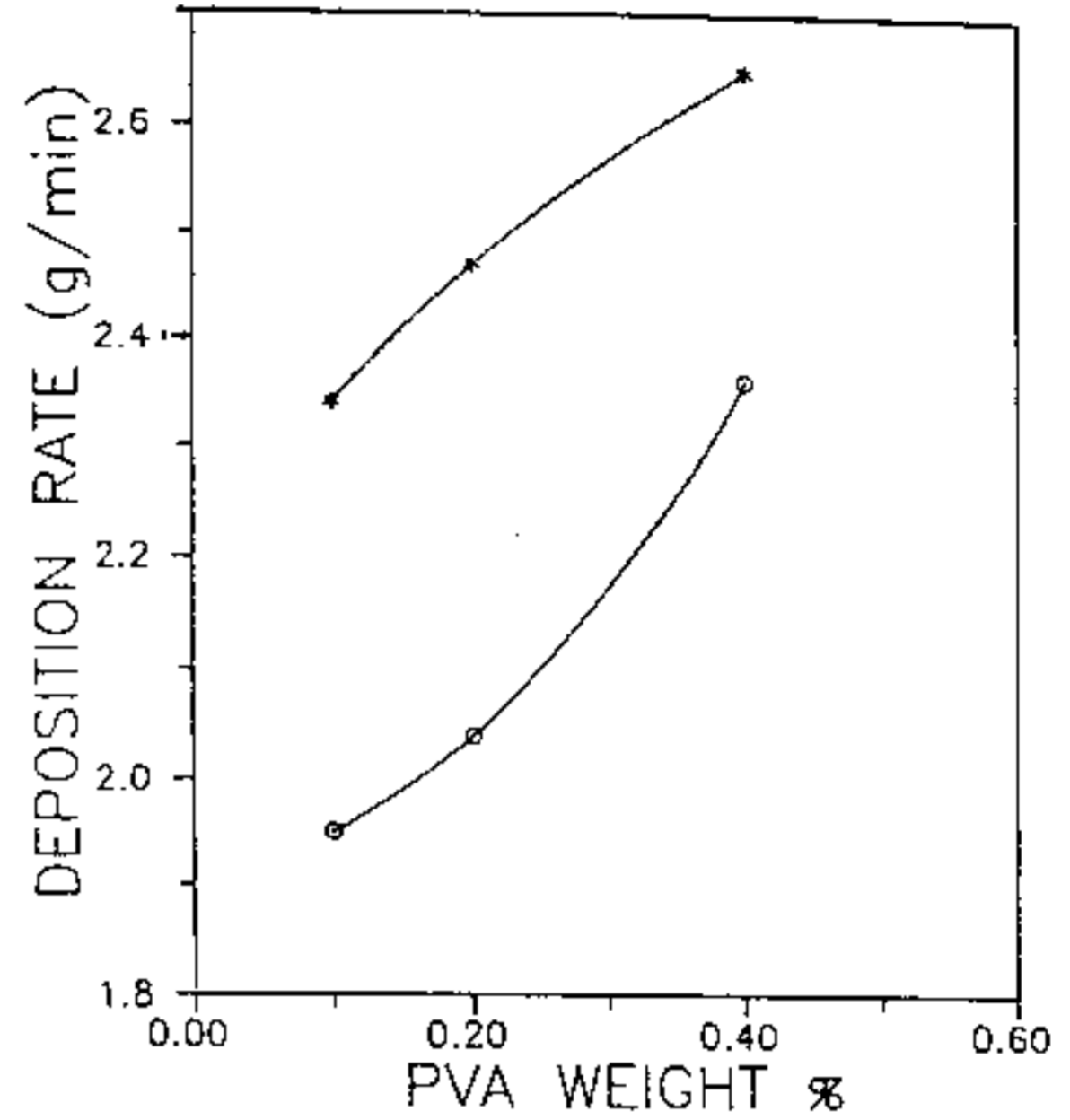


Fig. 6 Deposition rate of Zeosil - 155(*) and Zeosil - 55(○) as a function of PVA concentration.

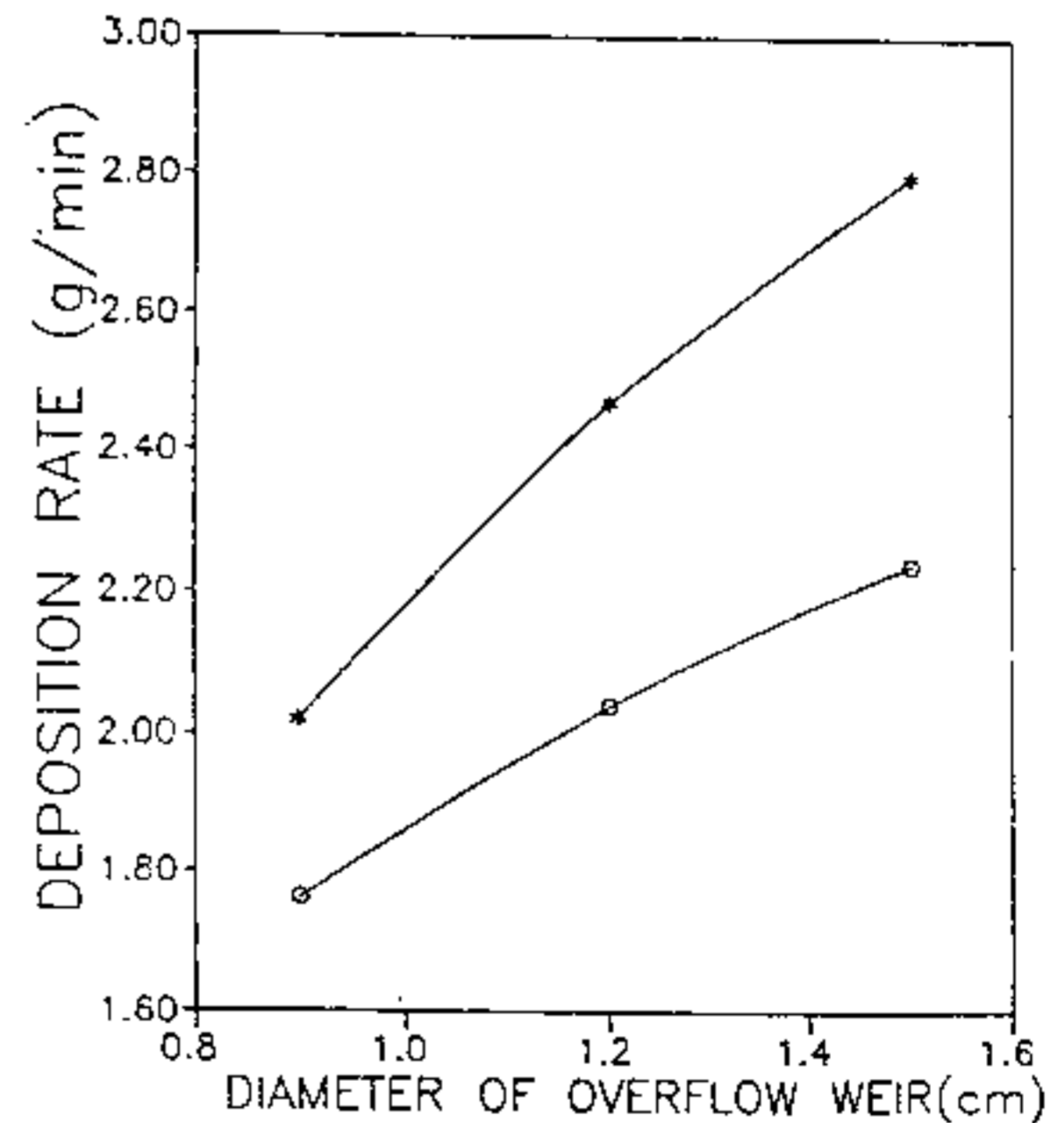


Fig. 7 Deposition rate of Zeosil - 155(*) and Zeosil - 55(○) as a function of overflow weir diameter.

광섬유 제조에 이용되는 실리카와 이의 원료물질인 SiCl_4 는 고순도로써 고가의 물질이기 때문에 부착속도와 함께 부착효율이 제조 원가에 미치는 영향이 크기 때문에 경제적인 관점에서 부착효율이 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 따라서 본 실험에서는 Zeosil-155와 Zeosil-55에 대하여 실험변수를 변화시키면서 부착효율을 측정하였다.

그림 8은 rotor의 회전수 변화에 따른 부착효율의 변화를 나타내고 있다. 원심력의 크기는 rotor 회전수의 자승에 비례하여, 또한 입자 크기에 비례하여 증가하므로 rotor 회전수 증가에 따라서 SiO_2 의 부착효율은 증가하고 있으며 입자 크기가 큰 Zeosil-155의 부착효율이 Zeosil-55보다 높게 나타나고 있다.

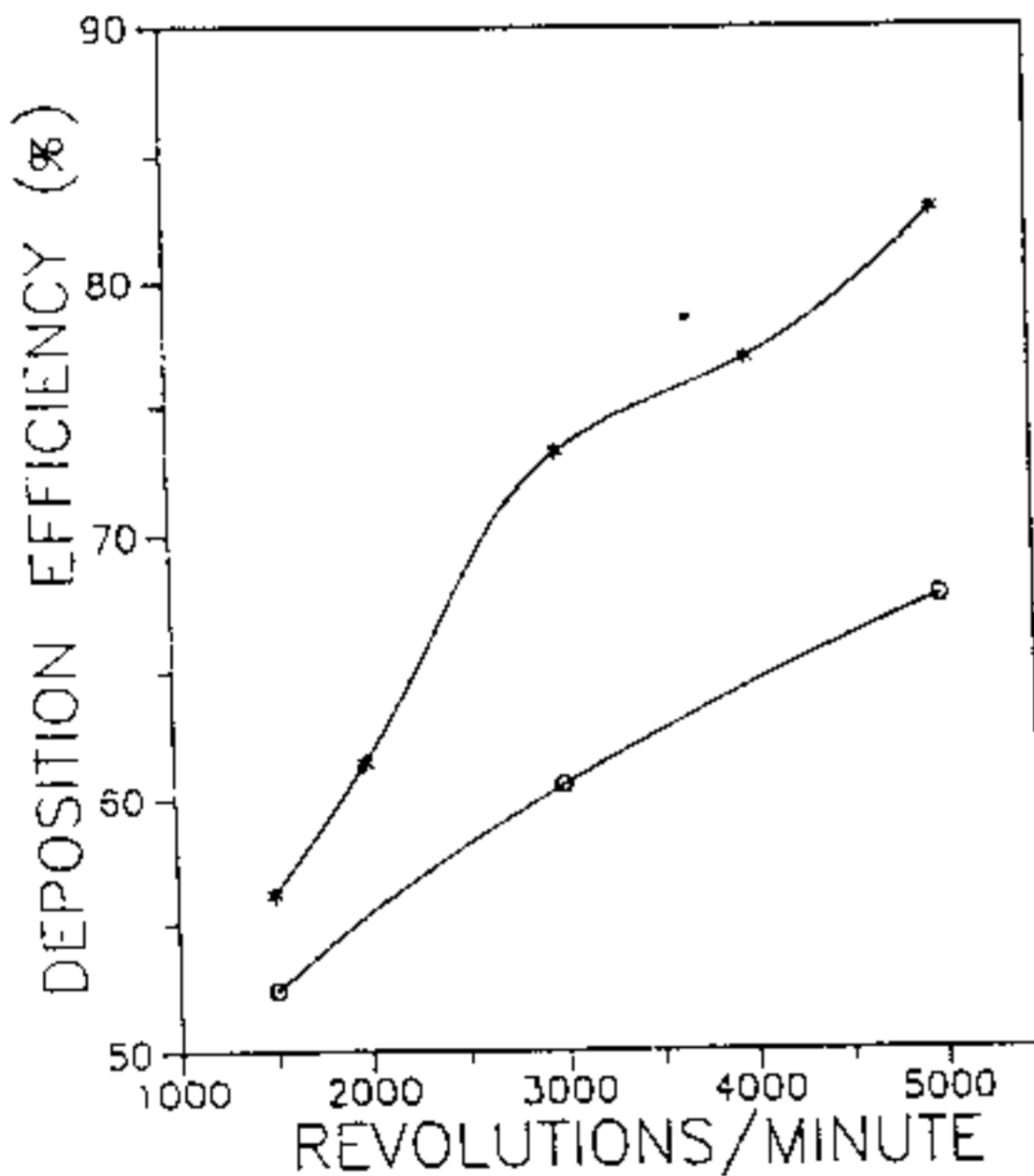


Fig. 8 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(○) as a function of rotation speed of rotor.

그림 9에서는 SiO_2 의 농도를 변화시키면서 측정한 부착효율을 나타내고 있다. SiO_2 농도가 증가할수록 substrate tube에 쌓인

층의 두께가 빨리 두꺼워져서 수용액이 존재하는 공간의 반경이 작아지므로 원심력이 감소하여 부착효율이 감소하는 것으로 관찰되었다. binder인 PVA의 농도가 증가할수록 SiO_2 의 부착효율이 증가하고 있는 것을 그림 10에서 나타내고 있다.

PVA 농도가 증가할수록 SiO_2 입자가 substrate tube 표면에서 비교적 resuspension되지 않고 견고하게 부착되므로 부착효율이 증가하고 있다.

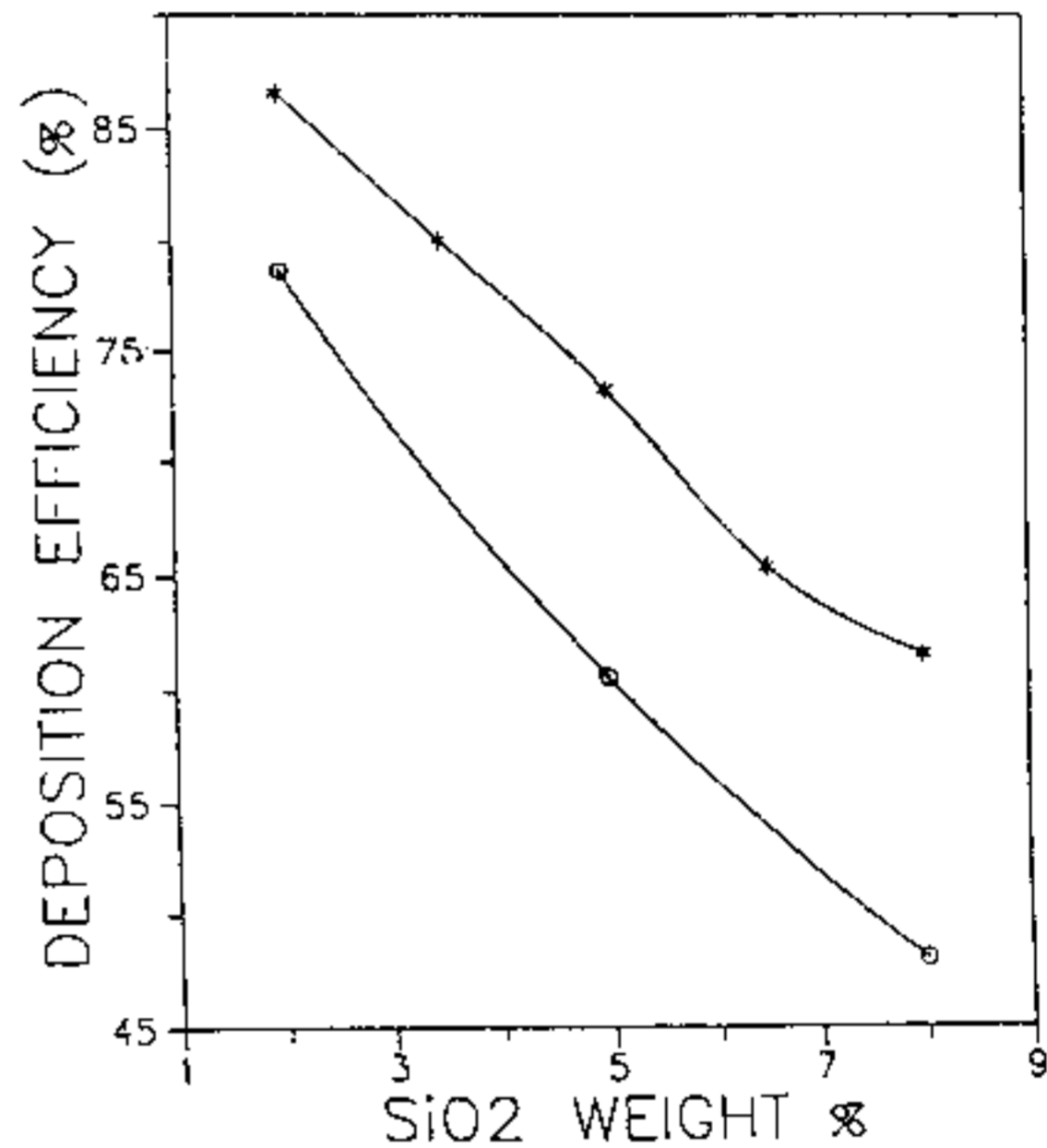


Fig. 9 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(○) as a function of suspension concentration.

그림 11은 overflow weir의 직경변화에 따른 부착효율을 보이고 있다. overflow weir의 직경이 커질수록 수용액의 rotor 내에서 체류시간은 감소하지만 수용액이 substrate tube벽 근처에 머무르게 되므로 overflow weir 직경에 비례하여 수용액에 가해지는 원심력이 증가하게 된다. 따라서 체류시간 감소와 원심력 증가현상이 부착효율에는 상반되는 효과를 가져오지만 결과에서 보이듯이 원심력 증가현상이 상대적으로

커서 overflow weir 직경이 커질수록 부착 효율이 증가함을 관측할 수 있다.

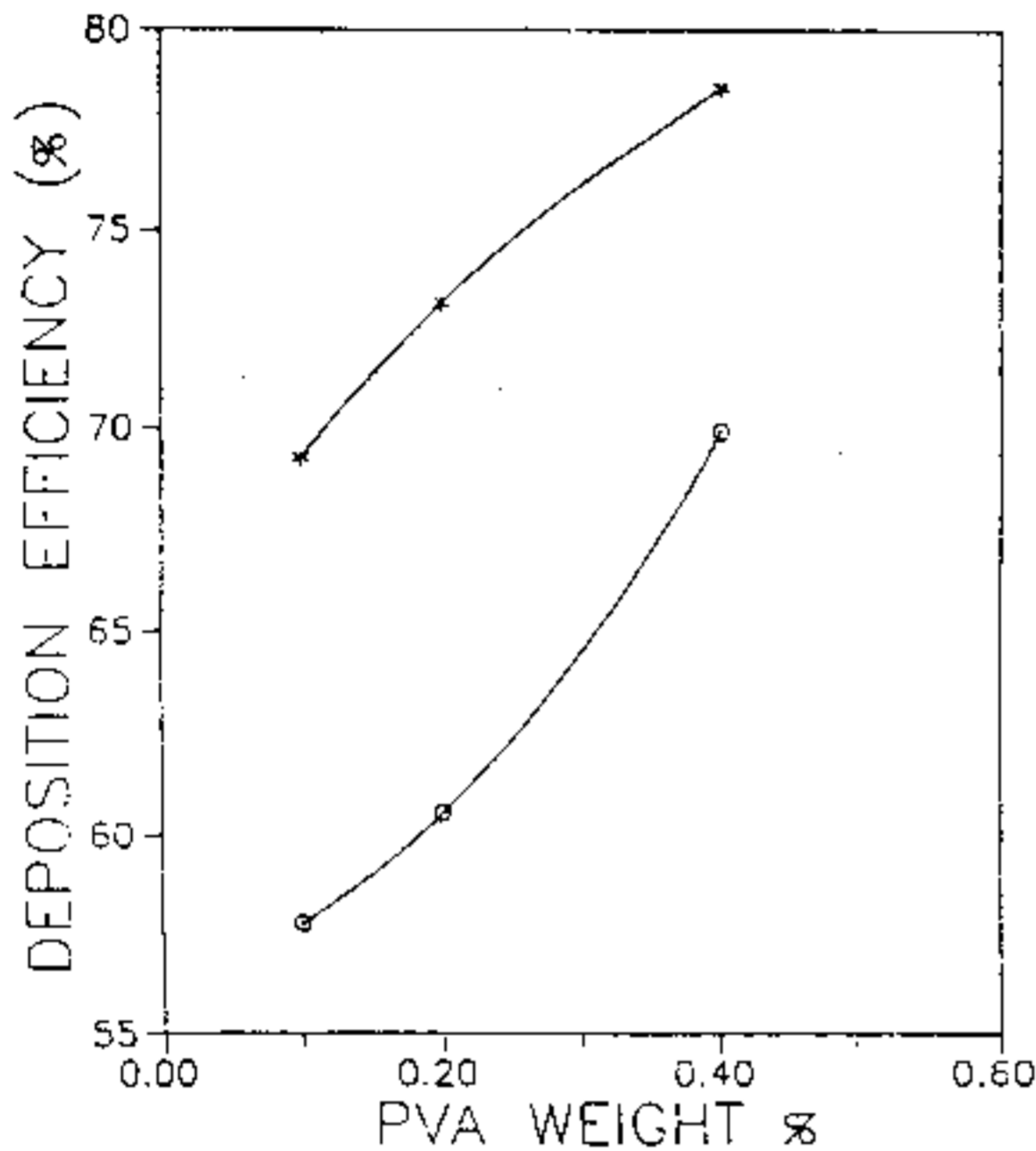


Fig. 10 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(o) as a function of PVA concentration.

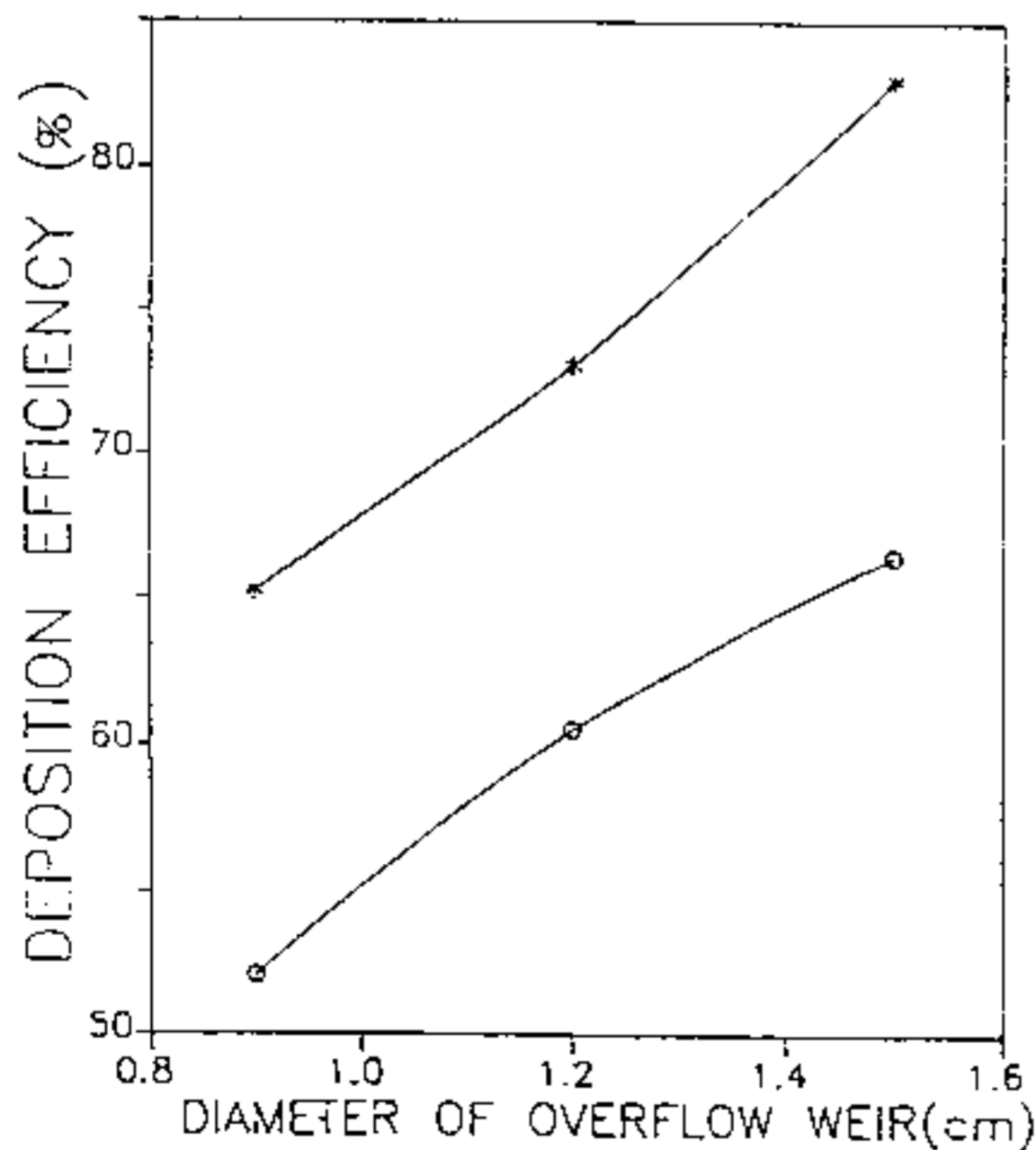


Fig. 11 Deposition rate of Zeosil-155(*) and Zeosil-55(o) as a function of overflow weir diameter.

4. 결 론

원심력을 이용하여 광통신용 광섬유 모재를 제조하는 실험장치를 제작하여 광섬유 모재를 제조하였다. 광섬유 모재 제조시의 SiO_2 의 부착효율과 부착속도에 영향을 미치는 실험변수들을 변화시키면서 실험 관찰하였다. 실험변수로서는 rotor 회전수, SiO_2 수용액의 주입유량, SiO_2 농도, PVA 농도, overflow weir 직경등을 변화시키면서 두종류의 SiO_2 입자인 Zeosil-155와 Zeosil-55 대해서 각각 실험을 하였다.

rotor의 회전수, SiO_2 농도, SiO_2 수용액 주입유량, PVA 농도, overflow weir 직경등이 증가함에 따라서 부착속도가 함께 증가했으며 rotor 회전수, 수용액 유량, PVA 농도가 증가할수록 또한 SiO_2 농도가 감소함에 따라 부착효율은 증가하였다. 두가지 입자 크기인 Zeosil-155와 Zeosil-55 입자에 대해 각각 같은 조건에서 부착속도 및 부착효율을 실험해 본 결과 입자크기가 커질수록 원심력이 커지므로 부착속도와 부착효율이 높게 나타났다.

이번 실험에서 Zeosil-55에서는 최대부착속도 = 2.942g/min, 최대부착효율 = 78.64%, Zeosil-155에서는 최대부착속도 = 3.342g/min, 최대부착효율 = 93.58%로 각각 측정되었다. 이 실험결과로부터 기존의 광섬유모재 공정인 OVD 공정, MCVD 공정, VAD 공정에서의 부착효율 (50-60%) 과 부착속도 (2-3g/min)에 비추어 볼때 본 제조공정이 지니고 있는 장점을 알 수 있다. 또한 지금까지의 실험은 다른 공정변수는 고정시키고 한가지의 공정변수를 변화시키면서 부착효율 및 부착속도를 실험한 결과이기 때문에 최적의 공정변수를 맞추어서 기계장치를 설비하고 실험에서 관찰된 최적조건을 맞추어 준다면 기존의 광섬유 모재 제조공정보다 부착효율과 부착속도 면에서 훨씬 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예측된다.

감 사

본 연구는 체신부, 한국통신공사의 후원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. Suematsu, Y. and K. I. Iga, "Introduction to Optical Fiber Communication", Wiley, New York (1982).
2. Kao, C. K., "Optical Fiber System : Technology, Design, and Application", McGraw - Hill, New York (1982).
3. Rowell, J. M., "Photonic Materials", Scientific American, October, 147 (1986).
4. Nagal, S. R., J. B. MacChesney and K. L. Walker, "An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance", IEEE J. Quantum Electron., QE - 18, 459 (1982).
5. Li, T., "Structures, Parameters, and Transmission Properties of Optical Fiber", Proc. IEE, 10, 1175 (1982).
6. Partus, F. P. and M. A. Saifi, "Light-guide Preform Manufacture", The Western Electric Engineer, 24, 38 (1980).
7. Sarkar, A., "Fabrication Techniques for High Quality Optical Fiber", Fibers and Integrated Optics, 135 (1985).