

PDMS 마이크로채널 유체유동에 미치는 표면거칠기에 관한 연구

김영민[†]·김우승*·이상훈**·백주열***

Effects of the surface roughness on Flow Characteristics in PDMS Microchannels

Young-Min Kim, Woo-Seung Kim, Sang-Hoon Lee and Ju-Yeoul Baek

Key Words: MEMS(미소전자기계시스템), Microchannel(마이크로채널), Roughness Viscosity Model (RVM), Polydimethylsiloxane(PDMS), Microfluidic(미소유체소자), Micromolding(마이크로주조)

Abstract

Experiments were conducted to investigate the flow characteristics of water through rectangular PDMS microchannels with a hydraulic diameter ranging from 66.67 to 200 μm . In the experiments, the flow rate and pressure drop across the microchannels were measured at steady states. The experimental results were compared with the predictions from the conventional laminar flow theory. A significant difference between the experimental data and the theoretical predictions was found. Experimental results indicate that the pressure gradient and flow friction in microchannels are higher than those from the conventional laminar flow theory. This may be attributed to the fact that there exists effect of surface roughness of the microchannels. In this study, a surface roughness model is implemented to interpret the experimental data. A good agreement between the experimental data and the numerical predictions with a surface roughness model were found.

연구는 아직 부족한 실정이다.

1. 서론

마이크로채널은 단일체적 당 높은 표면적을 가지며 소형으로 장치를 제작할 수 있어 열교환기, 화학 반응기, 항공 우주산업 및 약물 주입장치나 Bio-MEMS와 같은 생물 의학용 응용제품 등에 널리 쓰이고 있으며 최근 10여 년 동안 마이크로전자기계시스템(MEMS)의 가공기술과 응용 분야는 급속한 진보를 보이고 있다. 이러한 미소기구(micro device)의 성능향상을 위한 설계와 최적화를 위하여 마이크로채널 유동에 대한 이해가 필수적이나 마이크로채널 유동은 종종 전통적인 유체역학 이론과 상당한 차이를 보이며 이에 관한

Wu와 Little⁽¹⁾은 소형 Joule-Thompson 냉동기에 사용되는 마이크로채널에 관한 연구를 수행하였으며 일부 식각된 실리콘 또는 유리 마이크로채널에서 상당히 큰 표면 거칠기가 측정되었으나 매끄러운 마이크로채널에서의 마찰계수는 거시유동(macro scale flow)에서 예측되는 마찰계수와 일치하는 결과를 보인다고 보고하였다. Tuckerman과 Pease⁽²⁾는 사각형 단면을 갖는 마이크로채널 관로에서의 유체유동에 관한 연구를 수행하여 유로를 흐르는 유량은 Poiseuille 방정식을 만족한다고 하였으며 Flockhart와 Dhariwai⁽³⁾의 마이크로채널 연구에서도 거시유동에서 예측되는 결과와 같은 마찰계수를 나타낸다고 하였다.

Peng 등⁽⁴⁾은 0.133에서 0.367mm의 수력직경을 갖고 종횡비가 0.333에서 1인 직사각형 단면을 갖는 마이크로채널 유체 유동에 관한 실험을 통해 수력직경 및 종횡비와 같은 기하학적인 변수가 유동 저항에 미치는 영향에 관한 연구를 수행

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : minies@templab.hanyang.ac.kr

TEL: (031)416-8649 FAX: (031)418-0153

* 한양대학교 공학대학 기계공학과

** 단국대학교 의과대학 의공학과

*** 단국대학교 의과대학 의공학과

하였다. 7가지 경우 중 종횡비가 0.5인 2가지 마이크로채널의 마찰계수는 거시유동에서 예측되는 마찰계수보다 작은 값을 나타내었으나 그 외 5가지 경우에는는 보다 큰 값을 나타낸다고 보고하였다. 2-propanol, n-propanol 및 silicone oil을 사용하여 Pfahler 등⁽⁵⁾은 마이크로채널 유동의 마찰계수는 두 가지 경우를 제외한 모든 경우에서 이론적 값 보다 낮은 마찰계수가 측정되었다고 하였다. Choi 등⁽⁶⁾은 질소가스를 작동유체로 하여 직경이 3에서 81 μm 인 마이크로튜브에서 층류 및 난류 유동 실험을 수행하여 마찰계수를 측정하였으며 거시유동에서 예측되는 값보다 작게 측정되었다고 보고하였다. 이와 유사한 연구가 직경 19에서 102 μm 의 마이크로튜브에서 레이놀즈수(Re 수) 20,000까지 Yu 등⁽⁷⁾에 의해 수행되었으며 예측되는 값보다 층류 유동에서 19%, 난류 유동에서는 5% 낮은 마찰계수가 측정되었다.

Mala와 Li⁽⁸⁾는 내경이 50~254 μm 인 마이크로튜브 액체 유동에서 Re 수 2100까지 압력구배를 측정하였다. Mala와 Li⁽⁸⁾는 내경이 150 μm 이상인 마이크로채널의 마찰계수는 거시유동과 근사적으로 일치하는 결과를 보이나 그 이하의 마이크로튜브에서는 35% 정도까지 큰 마찰계수를 나타낸다고 하였다. 한편 Re수의 증가에 따라 이러한 차이가 더욱 증가한다고 보고하였으며 이는 층류에서 난류로의 천이 혹은 표면 거칠기에 기인한다고 하였다. Qu 등⁽⁹⁾은 사다리꼴 단면을 갖는 마이크로채널에서 유사한 실험을 수행하여 마이크로채널의 마찰계수는 거시유동보다 8에서 38% 큰 값을 보인다고 하였다.

이와 같이 마이크로채널 유동에서의 마찰계수에 관한 현재까지의 실험결과는 일관된 결과를 나타내지 않고 거시유동에서 예측되는 값과 같거나 높거나 혹은 낮게 나타나는 모순된 결과를 보이고 있다. 한편 마이크로채널의 표면 거칠기가 마이크로채널 유동에 미치는 영향에 대한 연구는 충분하지 않으며 실험결과와 전통적인 유체역학 이론과의 차이를 규명하기 위해서는 보다 많은 연구가 수행되어야 한다.

Polydimethylsiloxane(PDMS)는 기계적 특성이 우수하고 마이크로주조(Micromolding) 기법을 사용하여 제작이 간단하고 가격이 싸며 산화와 자외선에 대한 저항성, 방수성, 생체적합성 등의 장점이 있어 최근 Lab-on-a-Chip, Bio-MEMS 분야에서

많은 관심을 받고 있는 물질이다.⁽¹⁰⁾ 그러나 PDMS를 사용한 미소기구의 설계, 제작 및 최적화를 위한 PDMS 마이크로채널 유체유동에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 PDMS 마이크로채널에서의 유체 유동특성에 관한 실험을 수행하고 실험 결과를 수치적으로 분석하여 유체 유동에 미치는 PDMS 마이크로채널의 표면 거칠기 효과에 대한 연구를 수행하고자 한다.

2. PDMS 마이크로채널 제작

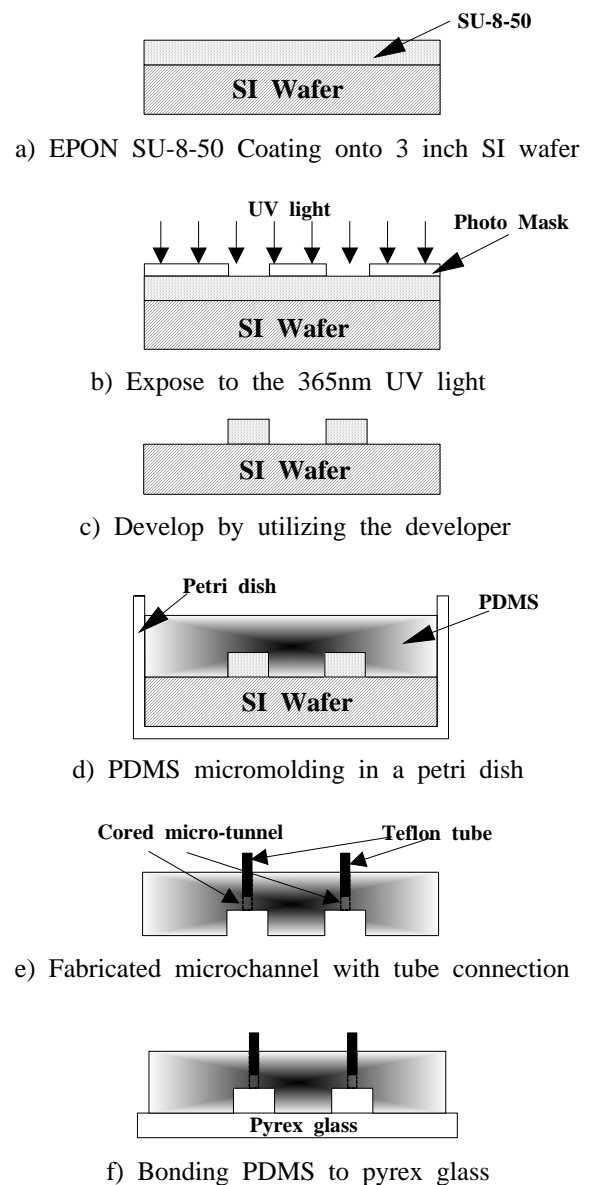


Fig. 1 Schematic illustration of the micromolding process for PDMS microchannel.

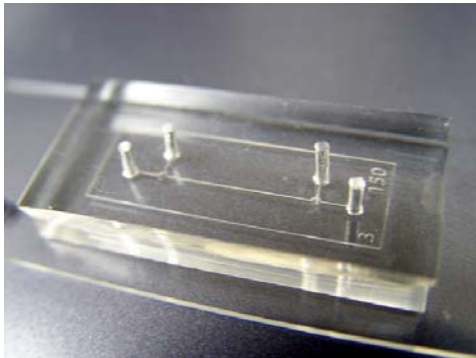


Fig. 2 Photograph of the finished PDMS microchannel.

PDMS 마이크로채널은 마이크로구조기법을 사용하여 제작된다. Fig. 1에 마이크로구조 과정의 개략도를 나타내었다. Fig. 1 (a)에 나타낸 바와 같이 자외선에 활성화되는 EPON SU-8 (Microchem Corp., Newton, MA) 에폭시 수지를 3인치 실리콘 웨이퍼 상에 골고루 바른 후 스피너 코터 (Spin coater)의 회전속도를 조절하여 도포되는 SU-8의 두께를 조절 한다. 이때 에폭시 수지의 두께가 PDMS 마이크로채널의 깊이를 결정한다. 에폭시 수지 도포 후 95℃의 열판(hotplate)에서 35분가량 가열하여 수지를 굳힌 후 16,000DPI로 프린트 된 포토 마스크를 씌우고 365nm 자외선 (UV)에 노광시킨다.(Fig. 1(a)) 노광이 완료 된 웨이퍼를 열판에서 30분 동안 95℃로 가열한 후 현상액(SU-8 solvent)에 담가 현상하여 마이크로채널 주형을 완성한다.(Fig. 1(c)) PDMS prepolymer와 고상 약품 (Sylgard 184 silicone elastomer kit, Dow Corning, Midland, MI)을 10대 1의 비율로 혼합하여 잘 섞고 진공조에서 기포를 제거한다. 채널 패턴이 만들어진 웨이퍼를 페트리접시에 넣고 준비된 액상 PDMS를 부은 다음 80℃의 열판에서 2시간정도 가열하여 PDMS를 고형화 시킨 후 상온에서 냉각시킨다.(Fig. 1(d)) 고형화 된 PDMS를 웨이퍼에서 떼어내고 원하는 크기로 자른 후 12

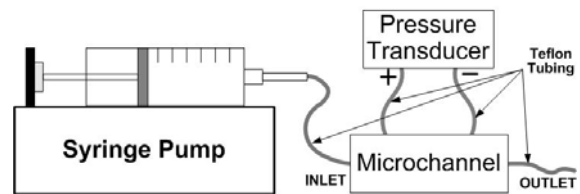
Table. 1 Characteristic dimensions of the PDMS microchannels.

Channel No.	Hight(μm)	Width(μm)	d_h (μm)	k (μm)
1	50	100	66.67	2.0
2	70	100	82.35	2.0
3	100	100	100	2.0
4	100	150	120	2.0
5	100	200	133.33	2.0
6	150	150	150	2.0
7	200	200	200	2.0

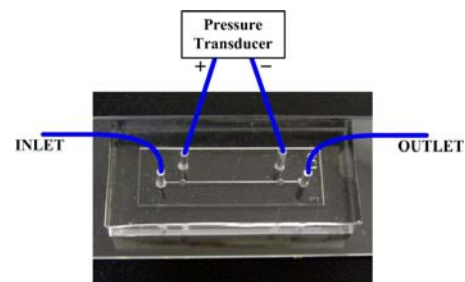
게이지 주사바늘을 사용하여 유, 출입구 및 압력 측정 포트를 뚫고 물로 세척한다.(Fig. 1(e)) 패턴이 완성된 PDMS와 슬라이드 글라스의 접합부를 Reactive Ion Etching(RIE) 장치에서 Oxygen Plasma에 노출 시켜 표면을 활성화 시킨 후 접합시켜 PDMS 마이크로채널을 완성한다.(Fig. 1(f)) Fig. 2에 완성된 마이크로채널의 사진을 나타내었다. 본 연구에서는 66.67에서 200 μm 의 수력직경 (d_h)을 갖는 마이크로채널을 사용하였으며 Table. 1에 각 채널의 폭과 높이 및 Surface Profiler (Tencor, Alpha Step 500)로 측정된 채널 벽면의 표면 거칠기(k)를 나타내었다.

3. 마이크로채널 유동 실험 및 수치해석

Fig. 3에 PDMS 마이크로 채널 유동 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 초순수 증류수 제조장



a) Schematic drawing of the experimental setup



b) Zoomed view of the tube connections

Fig. 3 Schematic of the experimental system for measuring liquid flow in microchannels.

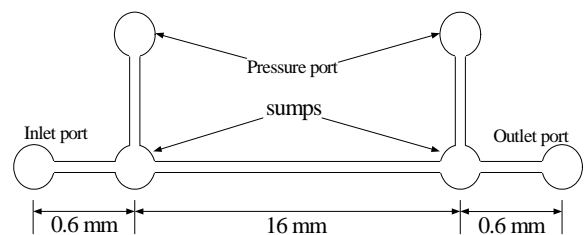


Fig. 4 Schematic drawing of the microchannel pattern.

치(Distillation system, Human Tech., Pure UP DLX1)에 의해 필터링 된 증류수를 주사기 펌프 (Syringe pump, KD Scientific, KDS 200)로 마이크로 채널에 흘려보내며 압력 포트를 통해 마이크로 채널 유동에서의 압력 강하량을 측정하였다. Fig. 4에 제작된 PDMS 마이크로 채널의 패턴을 나타내었으며 입구 효과를 제거하기 위해 입, 출구로부터 0.6mm 떨어진 위치에 압력포트를 설치하였다. 마이크로 채널 제작 시 실리콘 웨이퍼 상에 동일한 패턴을 세 개씩 만들어 각각의 채널에 대한 반복 실험을 수행하였다. 펌프로 유체를 흘린 후 정상 상태가 되면 각 패턴 당 5회씩 15에서 30분 동안 압력 포트 사이의 차압 변화가 없을 때 디지털 압력계(Digital manometer, Sper Scientific, EW6860300)로 차압을 측정하였으며 본 연구에서 수행된 실험은 Class 1000인 클린 룸에서 약 25°C의 분위기 상에서 수행되었다.

PDMS 마이크로 채널의 유체 거동을 살펴보기 위해 Fig. 4의 패턴 중 입, 출구 및 압력 포트 부분을 제외한 16mm 길이의 마이크로 채널 격자를 형성하고 입구의 압력조건을 변화시키며 상용 열유체 해석프로그램인 STAR-CD⁽¹¹⁾를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 한편 입, 출구에는 일정 압력 경계조건을 주었으며 채널벽면은 고착경계조건(no-slip condition)을 사용하였다.

PDMS 마이크로 채널 유동에서 Re수에 대한 압력 강하량(P_x)의 실험값 및 Navier-Stokes 방정식을 사용한 수치해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5(a)와 5(b)에 나타난 바와 같이 모든 채널에 대해서 $P_x - Re$ 곡선은 선형적으로 증가하며 수치해석 곡선이 실험값 보다 아래에 있음을 알 수 있다. Re수 증가에 따라 수치해석으로부터 예측된 압력 손실 값에 비해 실험에서 측정된 압력 손실은 13에서 22%까지 크게 나타났으며 이 결과로부터 PDMS 마이크로 채널 유동에서는 전통적인 유체역학 이론에서 예측되는 값보다 큰 압력 손실이 발생함을 알 수 있다.

4. 표면 거칠기 효과

실험이 완료된 PDMS 마이크로 채널의 옆면과 윗면을 커터로 잘라 절편을 만든 후 Surface Profiler로 표면 거칠기를 측정하였다. 마이크로구조기법을 사용하여 PDMS 마이크로 채널을 제작

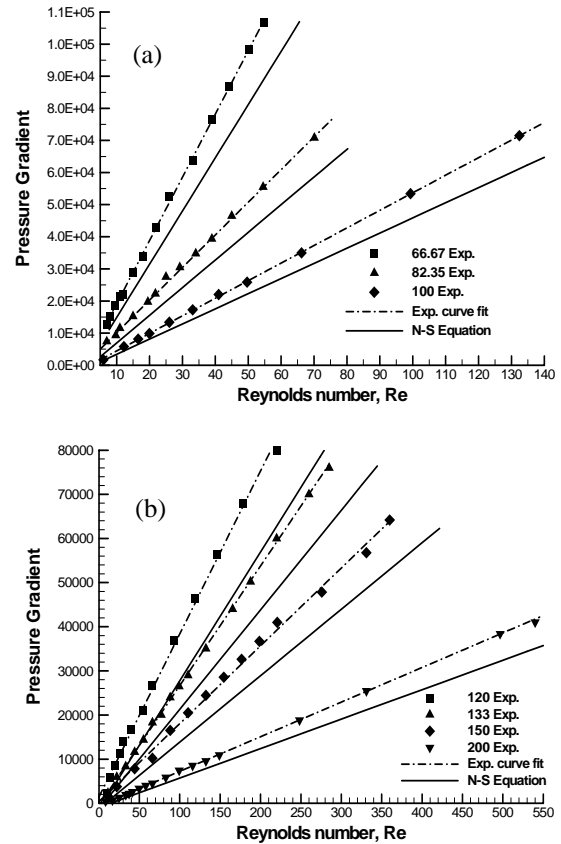


Fig. 5 A comparison of the experimental data of pressure gradient vs. Reynolds number with the predictions from conventional laminar flow theory: (a) $d_h = 66.67, 82.35, 100 \mu\text{m}$; (b) $d_h = 120, 133, 150, 200 \mu\text{m}$.

하므로 Photoresist에 접촉되는 채널 윗면의 표면 거칠기는 평균 24nm로서 평균 10nm의 표면 거칠기를 갖는 슬라이드글라스와 같이 상당히 매끄러운 주형으로부터 떼어내야 하는 옆면의 표면 거칠기는 Table 1에 나타난 바와 같이 평균 $2.0 \mu\text{m}$ 로 측정되었으며 매우 거친 표면임을 알 수 있다. 채널 수력 직경이 밀리미터 단위 이상일 경우 유동채널의 표면 거칠기가 유체 유동에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 작으나 본 연구에서 제작된 PDMS 마이크로 채널의 경우 $2k/d_h$ 의 값이 2에서 6%정도이므로 표면 거칠기의 영향을 무시할 수 없으며 유체 유동저항을 크게 할 것으로 예상된다.

여러 연구자들이 유동에 대한 표면 거칠기에 관한 연구^(8,9,12,13)를 수행하였으며 표면 거칠기의 존재는 층류 속도구배에 영향을 주며 Re 수를 감소시킨다고 보고하였다. Merkle 등⁽¹²⁾의 Modified

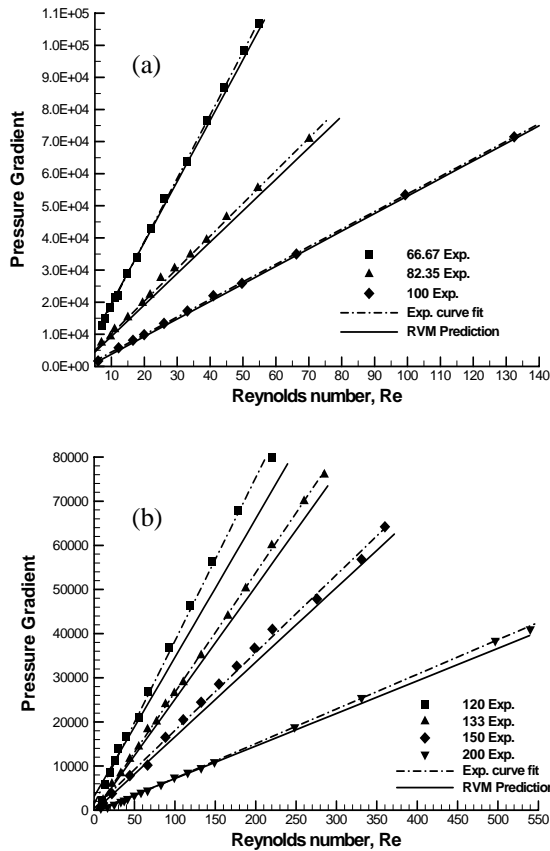


Fig. 6 A comparison of the experimental data of pressure gradient vs. Reynolds number with the predictions from the roughness-viscosity model: (a) $d_h = 66.67, 82.35, 100 \mu\text{m}$; (b) $d_h = 120, 133, 150, 200 \mu\text{m}$.

viscosity model에 근거하여 Mala와 Li⁽⁸⁾는 Roughness viscosity model을 제안 하였으며 마이크로튜브에서의 층류유동에 대한 표면 거칠기의 효과를 설명하였다. Mala와 Li⁽⁸⁾는 일반적으로 거친 표면은 벽면 근처의 경계층에서 운동량 전달을 증가시키며 이러한 운동량 전달의 증가는 난류 모델에서의 와점성계수(eddy-viscosity)와 유사한 Roughness viscosity, μ_R 을 도입하여 고려할 수 있다고 하였다. 한편 Mala와 Li⁽⁸⁾는 원형 단면을 갖는 마이크로 채널에서의 모델을 제시하였고 Qu 등⁽⁹⁾은 이를 실리콘 웨이퍼에 식각된 사다리꼴 마이크로 채널에 적용하였다.

Roughness viscosity라는 개념에 따라 μ_R 은 벽면 근처에서 큰 값을 갖고 벽면으로 멀어질수록 서서히 감소하여야 하며 Re 수에 비례하여야 한다. 본 연구에서는 마이크로주조기법으로 제작된 PDMS 마이크로 채널의 직사각형 단면에 대해

Mala와 Li⁽⁸⁾가 제안한 Roughness viscosity model을 적용 하였으며 물의 점성 계수에 대한 Roughness viscosity의 비는 다음과 같다:

$$\frac{\mu_R}{\mu} = A Re_k \frac{(R_h - l_{\min})}{k} \left(1 - \exp\left(-\frac{Re_k (R_h - l_{\min})}{k}\right) \right)^2 \quad (1)$$

여기서 A 는 실험결과로부터 결정되어야 하는 값이며 R_h 는 수력 반지름, l_{\min} 은 채널 벽면으로부터 가장 가까운 거리, Re_k 는 Roughness Re 수를 나타내며 다음과 같이 정의 된다.⁽¹²⁾

$$Re_k = \frac{U_k \rho k}{\mu} \quad (2)$$

여기서 U_k 는 Roughness element 상부에서의 속도를 나타내며 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$U_k = \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_\Gamma k \quad (3)$$

식 (1)에서 계수 A 를 제외한 모든 변수는 유동장과 채널 크기 및 마이크로 채널의 표면 거칠기로부터 결정할 수 있다. 계수 A 는 식 (1)에 나타난 변수뿐만 아니라 채널 단면의 모양이나 Roughness element의 분포 등에 영향을 받으므로 채널 마다 동일한 값을 갖지 않는다. 그러나 실험에서 측정된 결과를 바탕으로 시행 착오법을 적용하여 수치적으로 결정할 수 있으며⁽⁸⁾ 본 연구에서 사용된 PDMS 마이크로 채널에 대한 계수 A 는 다음과 같다.

$$A = 6.8 \left(\frac{R_h}{k} \right)^{0.35} \exp\left\{ Re^{0.95} \left(5.5 \times 10^{-5} \frac{R_h}{k} - 0.0029 \right) \right\} \quad (4)$$

식 (4)의 계수 A 를 사용하면 식 (1)에 나타난 Roughness viscosity를 계산할 수 있다.

Fig. 6(a)와 (b)에 실험에서 측정된 $P_x - Re$ 곡선과 Roughness viscosity model을 적용한 수치해석 결과를 나타내었다. Fig. 6(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 Roughness viscosity를 적용한 수치해석 결과는 실험결과와 상당히 일치되는 결과를 나타내었다. 따라서 PDMS 마이크로 채널에서 유체 유동을 수치해석 할 경우 식 (1) ~ (4)에 나타난 Roughness viscosity를 적용하면 실험결과에 의존하지 않더라도 보다 타당한 수치해석 결과를 얻

을 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 66.67에서 $200\mu\text{m}$ 의 수력직경을 갖는 PDMS 마이크로채널을 제작하여 유동 실험을 수행하고 실험결과를 수치적으로 분석하여 유체 유동에 미치는 PDMS 마이크로 채널의 표면 거칠기 효과에 대한 연구를 수행하였다.

Re수 증가에 따라 수치해석으로부터 예측된 압력 손실 값에 비해 실험에서 측정된 압력 손실은 13에서 22%까지 크게 나타났으며 이 결과로부터 PDMS 마이크로채널 유동에서는 전통적인 유체 역학 이론에서 예측되는 값보다 큰 압력 손실이 발생함을 알 수 있다.

채널 수력 직경이 밀리미터 단위 이상일 경우 유동채널의 표면 거칠기가 유체 유동에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도로 작으나 본 연구에서 제작된 PDMS 마이크로 채널의 경우 채널 수력직경에 대한 상대 표면 거칠기가 2에서 6% 정도이므로 표면 거칠기의 영향을 무시할 수 없으며 이에 대한 고려가 필요하다.

직사각형 단면을 갖는 PDMS 마이크로 채널 유체유동에 대해 Mala와 Li⁽⁸⁾가 제안한 Roughness viscosity model을 적용 하였으며 Roughness viscosity를 적용한 수치해석 결과는 실험결과와 잘 일치되는 결과를 나타내었다.

후 기

이 논문은 한국과학재단 2003년도 특정기초 연구사업의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Wu, P. Y. and Little, W. A., 1983, "Measurement of friction factor for flow of gases in very fine channels used for microminiature Joule-Thompson refrigerators," *Cryogenics*, Vol. 24, No. 8, pp. 273-277.

(2) Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., 1981, "High-performance heat sinking for VLSI," *IEEE Electron Device Letter*, EDL-2, pp. 126-129.

(3) Flockhart, S. M. and Dhariwal, R. S., 1998, "Experimental and numerical investigation into the flow characteristics of channels etched in <100> silicon," *Transactions of the ASME: J. Fluids Engineering*, Vol. 120, pp. 291-295.

(4) Peng, X. F., Peterson, G. P. and Wang, B. X., 1994, "Frictional flow characteristics of water flowing through rectangular microchannels," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 7, pp. 249-264.

(5) Pfahler, J. N., Harley, J., Bau, H., and Zemel, J., 1990, "Liquid transport in micron and submicron channels," *Sensors and Actuators A*, Vol. 22, No. 1/3, pp. 431-434.

(6) Choi, S. B., Barron, R. F. and Warrington, R. O., 1991, "Fluid flow and heat transfer in microtubes," *ASME DSC Micromechanical Sensors, Actuators and Systems*, Vol. 40, pp. 123-134.

(7) Yu, D., Warrington, R., Barron, R. and Ameer, T., 1995, "An experimental and theoretical investigation of fluid flow and heat transfer in microtubes," *Proc. of ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, March 19-24, Maui, HI, pp. 523-530.

(8) Mala, G. M. and Li, D., 1999, "Flow characteristics of water in microtubes," *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 20, pp. 142-148.

(9) Qu, W., Mala, G. M. and Li, D., 2000, "Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 353-364.

(10) Xia, Y. and Whitesides, G. M., 2000, "Soft Lithography," *Annual Review of Materials Science*, Vol. 12, No. 19, pp. 153-184.

(11) *STAR-CD ver. 3.0 Manual*, 1997, Computational Fluid Dynamics Ltd., London.

(12) Merkle, C. L., Kubata, T. and Ko, D. R. S., 1974, "An analytical study of the effects of surface roughness on boundary-layer transition," AF Office of Scientific Research, Space and Missile Sys. Org., AD/A004786.

(13) Tani, I., 1969, "Boundary layer transition," *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, Vol. 1, pp. 169-196.