

비균일계 마이크로채널에서의 유량 변화 특성

김진용 · 이효송 · 유재근 · 김기호 · 이영우[†]

충남대학교 화학공학과
(2005년 7월 18일 접수, 2005년 12월 23일)

Variation of Flow Rates in Heterogeneous Microchannel Systems

Jin-Yong Kim, Hyo-Song Lee, Jae-Keun Yu, Ki-Ho Kim, and Young Woo Rhee[†]

Department of Chemical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received July 18, 2005; accepted December 23, 2005)

본 연구에서는 polydimethylsiloxane (PDMS)와 glass로 이루어진 마이크로채널의 너비와 깊이 및 외부전압에 따른 특성을 알아보기 위하여 각각의 마이크로채널에서의 유량 변화를 조사하였다. PDMS와 SU-8 감광체를 사용하는 soft lithographic method 기술을 사용하여 마이크로채널을 만들었다. 채널의 깊이 50 μm 와 100 μm 에 대하여, 채널의 너비를 100 μm , 200 μm , 300 μm 로 하여 제작하였으며, 각각의 마이크로채널에 0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV 그리고 0.45 kV의 외부전압을 걸어 유량 변화를 측정하였다. 실험 결과, 동일한 너비를 갖는 마이크로채널에서는 외부전압이 증가함에 따라 유량이 증가하였다. 이는 외부전압이 증가함에 따라 전기장이 증가하기 때문이다. 동일한 외부전압에서 마이크로채널의 너비가 증가할수록 유량이 증가하는 경향이 나타났고, 이는 채널 너비의 증가가 내부의 저항을 감소시키는 효과를 가져온 것으로 사료된다. 또한, 동일하게 단면적을 두 배로 증가시켜 깊이와 너비의 영향을 조사한 결과, 저 전압에서는 깊이의 영향이 크게 나타났으며 고 전압에서는 너비의 영향이 크게 나타났다.

This study investigated the variation of flow rates in microchannels that consisted of polydimethyl siloxane (PDMS) and glass using various external voltages. Three different microchannel widths and two different depths. PDMS and negative photoresist (SU-8) were used to make the microchannels by the soft lithographic method. For each depth of microchannel (50 μm and 100 μm), three different widths (100 μm , 200 μm and 300 μm) were made. In each case, several different external voltages were applied (0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV and 0.45 kV) to examine the flow rates. Our results indicated that flow rate increased with an increase of the external voltage at the same microchannel width. This was because the electrical field was increased as the external voltage increased. For the same external voltage, the flow rate increased as the microchannel's width increased. These results showed that the resistance in the microchannel decreased as the microchannel's width increased. Also, to investigate the effect of microchannel's depth and width, the cross-sectional area of the microchannel was increased to the double in area. As a result, the effect of the microchannel's depth was higher at a low external voltage, and the effect of the microchannel's width was higher at a high external voltage.

Keywords : microchannel, soft lithographic method, electric field, flow rate

1. 서 론

마이크로시스템은 기본적으로 micro-electro mechanic system (MEMS)을 기반으로 제작되어지며, 생물학적인 분리와 정제 그리고 화학적인 분석 및 의학적인 진단을 위하여 많은 기관에서 연구가 진행되고 있다[1-5]. 기존의 연구에서는 실리콘, 석영 또는 유리 등의 재료를 사용한 lithography와 etching이 마이크로시스템 제작에 주로 사용되었다[6]. 그러나 이러한 재료들은 많은 비용이 들고 제작하는 데 많은 제한이 있어, 다른 물질들을 찾고자하는 관심과 연구가 이루어졌다[1,2,7]. 이러한 연구를 통해서 polydimethylsiloxane (PDMS), polymethylmeth-

acrylate (PMMA), polystyrene 그리고 polycarbonate와 같은 고분자 물질들이 관심의 대상이 되었다[1,8]. 이 중에서도 다른 고분자 물질들에 비해 값이 싸고 제작이 용이한 PDMS를 이용한 마이크로시스템의 제작이 활발하게 이루어지고 있다[9-12]. 그러나 PDMS의 표면은 높은 소수성으로 인하여 마이크로시스템에서 유체의 흐름을 어렵게 하므로, 표면을 친수성으로 바꾸기 위한 연구가 필요하게 되었다. PDMS의 표면을 친수성으로 개질시키기 위한 방법에는 산소 플라즈마를 표면에 처리해 주거나 고분자와 단백질을 표면에 흡착시키는 방법, 그리고 UV 고분자 중합법 등이 있다[9,11,13-15]. 플라즈마로 처리된 PDMS 표면의 친수성은 접촉각의 변화를 나타나게 되며, 플라즈마의 강도 및 처리시간에 따라서 접촉각은 다양하게 변화된다[9,13,16]. 그렇지만 PDMS 표면의 친수성은 일정하게 유지되는 것이 아니

[†] 주 저자(e-mail: ywrhee@cnu.ac.kr)

Table 1. Soft Lithographic Method for the SU-8 Photoresist

Step	Process	Method
1	Substrate pretreatment	treat with hydromethyl-disiloxane (HMDS) for 10 min
2	Coating	step 1: 1000 rpm, 30 sec step 2: 2200 rpm, 30 sec for the depth of 100 μm 2800 rpm, 30 sec for the depth of 50 μm
3	Soft baking	20 min at 65 $^{\circ}\text{C}$, 50 min at 95 $^{\circ}\text{C}$
4	Exposure	180 sec
5	Post exposure baking	1 min at 65 $^{\circ}\text{C}$, 12 min at 95 $^{\circ}\text{C}$
6	Development	develop with the SU-8 developer for 10 min
7	Rinsing & drying	rinse with isopropyl alcohol (IPA) to dry with a gentle stream of nitrogen

라 시간이 흐름에 따라서 점차 소수성으로 바뀌게 되며, 이를 억제하기 위하여 PDMS 표면을 다른 물질로 코팅하거나 용액에 세척하기도 한다[17-19].

웨이퍼 위에 패턴을 생성하기 위해 본 실험에서 사용되어진 SU-8 감광제는 PDMS와 함께 사용하여 여러 가지 모양의 패턴을 만들 수 있으며, 마이크로채널의 제작에 많이 이용되고 있다[20,21]. 마이크로채널 내부에서 유체의 흐름은 전기삼투 흐름으로써, 채널 양쪽에 걸리는 외부전압의 세기를 조절하거나, 채널 내에 흐르는 유체의 pH를 조절함으로써 그 흐름을 보다 쉽게 제어할 수 있다[10,18,22]. 전기삼투에 의하여 흐르는 유체의 유속을 직접적으로 측정하는 방법은 아직 보고된 바 없으며, 주로 마이크로채널 내를 흐르는 유체에 형광물질이나 형광입자를 투입한 후, 형광현미경을 통하여 유체의 특성을 파악하거나 particle image velocimetry (PIV) 시스템을 사용하여 유체 흐름의 영역을 3차원 영상으로 관찰 할 수 있다[10,18,23,24].

본 연구에서는 마이크로시스템에서 외부전압의 변화와 마이크로채널의 너비변화 및 깊이변화가 마이크로채널 내에서 유체의 흐름에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. Soft lithographic method에 의해 만들어진 실리콘 웨이퍼 위의 패턴에 PDMS로 분을 때 유리와 접합시켜서 마이크로채널을 제작하였다. 채널의 깊이 50 μm 와 100 μm 에 대하여, 각각의 채널의 너비를 100 μm , 200 μm 그리고 300 μm 로 만들었으며, 외부전압은 0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV 그리고 0.45 kV로 변화시켜 유량을 측정하였다. 마이크로채널에서 유량을 측정하기 위하여 채널의 양쪽 끝에 흘러나온 유체를 저장할 수 있도록 하였으며, 저장소의 무게변화를 통하여 유체의 유량을 측정하였다. 실험으로부터 얻어진 유체의 유량변화를 통하여, 외부전압과 채널의 너비 및 깊이에 따른 마이크로채널에서의 유체의 흐름에 대한 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1. 마이크로채널의 제작

마이크로채널을 제작하기 위하여 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 원하는 형태와 크기를 갖는 패턴을 디자인하는 것이다. 디자인된 패턴은 고해상도(10,000 DPI)의 프린터를 사용하여 mask로 제작되었다. 마이크로채널의 깊이는 50 μm 와 100 μm , 길이는 40 mm로 하였으며, 채널의 너비는 각각의 채널 깊이에 대하여 100 μm , 200 μm 그리고 300 μm 로 달리하여 제작하였다. 웨이퍼 위의 패턴은 SEM image를

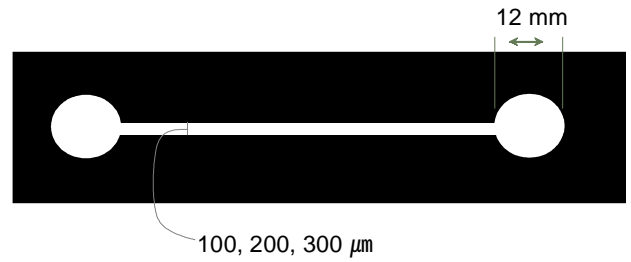


Figure 1. Mask of the microchannel (width: 100 μm , 200 μm and 300 μm , length: 40 mm, reservoir diameter: 12 mm).

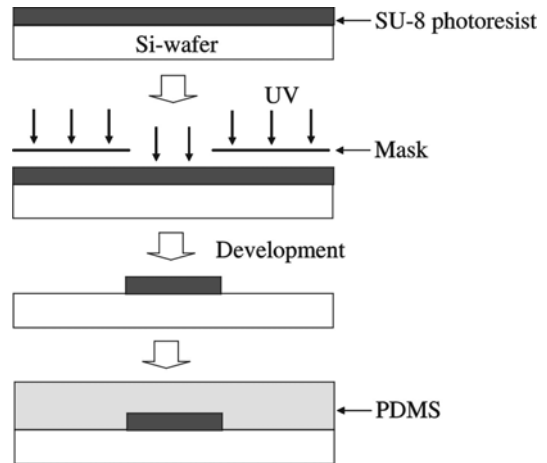


Figure 2. Fabrication procedure of soft lithographic method.

통해 관찰되었으며, 제작된 마이크로채널은 1% 이내의 오차범위를 보였다. 또한, 채널의 양쪽 끝에 adapter를 꽂을 수 있도록 직경 12 mm인 저장공간을 만들었으며, 채널 내에 유체가 흐르는 시간을 고려하여 유체의 속도를 분석하는데 용이하도록 저장공간을 크게 디자인 하였다. Figure 1은 본 연구에서 사용되어진 mask를 보여주고 있으며, Figure 2는 soft lithographic method를 이용한 마이크로채널의 제작방법을 간단히 보여주고 있다. mask 제작이 완료되면 실리콘 웨이퍼 (ULTRAPACK Wafershield™, H9100-0302) 위에 균일한 두께의 감광제(photoresist)를 코팅하는 것이 필요하며, 이를 위해서 웨이퍼와 감광제 사이의 저항을 줄이기 위한 전처리로서, 웨이퍼를 hydromethyl-disiloxane (HMDS)에 10 min동안 노출시켰다. 본 연구에서는 SU-8 (Microchem, USA) 음성 감광제를 사용하였으며, 감광제 두께를 제어하기 위하여 spin coater의 회전속도를 2단계로 조절하여 감광제를 코팅하였다. Table 1은 실리콘 웨이퍼 위에 패턴을 생성하는 과정을 나타내고 있으며, 원하는 채널의 깊이에 따라 코팅 공정에서 spin coater의 회전속도를 달리하였다. 웨이퍼 위에 일정한 두께로 감광제를 코팅한 후에는 감광제에 존재하는 용매를 제거하기 위하여, 건조기를 사용하여 65 $^{\circ}\text{C}$ 에서 20 min동안 가열하였고, 온도를 분당 1 $^{\circ}\text{C}$ 정도로 서서히 올린 후에 다시 95 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50 min 동안 가열하였다. 용매가 제거된 웨이퍼 위에 디자인된 채널의 mask를 올리고, 그 위에 웨이퍼와 mask가 밀착 되도록 유리판을 올린 후 180 sec 동안 UV (350 nm)에 노출시켰다. UV 노출 후에는 다시 65 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1 min 그리고 95 $^{\circ}\text{C}$ 에서 12 min 동안 가열하였다. 끝으로 현상과 세척을 거쳐서 원하는 형태의 패턴을 웨이퍼 위에 얻을 수 있다. 원하는 패턴이 웨이퍼 위에 완성되면 PDMS를 이용하여 분을 뜨게 되며, 그 전에 PDMS가 웨이퍼와 잘 떨어지도록 웨이퍼를 trimethylchlorosilane (TMCS)에 10 min

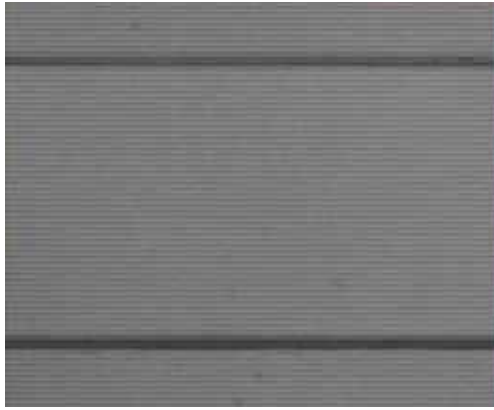


Figure 3. Inner shape of the microchannel.

동안 노출시키고, adapter을 미리 웨이퍼 위에 붙여서 추후에 adapter를 연결할 수 있는 공간을 만들어 주었다.

PDMS는 모노머 용액과 촉매가 들어있는 경화용액으로 구성되어 있고, 두 용액을 질량비 10:1로 섞어 사용하였다. PDMS를 부은 후, 진공건조기를 사용하여 60~65 cmHg 정도의 압력에서 1 h 정도 유지하면 PDMS 내에 존재하는 기포가 완전히 제거된다. 그 후에 60 °C에서 1 h 정도 고형화시키고 웨이퍼에서 떼어내면 PDMS 패튼이 형성되고, 유리판에 접합시켜 생성하고자 하는 마이크로채널을 완성할 수 있다.

본 연구에서는 채널의 너비와 깊이 변화 및 외부 전압의 변화에 따른 유체의 유량 변화를 측정하기 위하여, 완성된 마이크로채널의 양 끝에 adapter를 연결하고 양 끝에 저장소를 설치하여 마이크로채널 시스템을 완성하였다. Figure 3은 화상분석시스템(마이프로네트, BMI 150 MHz, CP700D)으로 관찰한 완성된 마이크로채널의 내부를 나타내고 있다.

2.2. 실험 방법

마이크로채널 내를 흐르는 유체로는 pH가 7.0인 완충용액(Weilheim, WTW pH 7.0, Technical buffer 50 mL)을 사용하였다. 이는 전기삼투 흐름에서 pH 변화에 따른 영향을 없애기 위해서이다. 일반적으로 마이크로채널 내에서 유체의 속도를 측정하기 위해서 형광물질이나 형광입자를 사용하지만, 본 연구에서는 마이크로채널의 양쪽 끝에 분리가 가능한 저장소를 연결하여, 일정 시간 전/후의 저장소의 무게변화를 통하여 유체의 유량을 측정하였다. 본 연구에서는 마이크로채널의 깊이 50 μm와 100 μm에 대하여 너비가 100 μm, 200 μm 그리고 300 μm 일 때, 각각에 대하여 외부전압을 0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV 그리고 0.45 kV로 달리하여 유체의 유량을 측정하였다. Figure 4는 본 실험에서 사용되어진 장치의 개략도를 나타내었다. 유체의 유량을 측정하기 위하여, 외부전압을 가해주기 전에 저장소의 무게를 측정한다. 그리고 일정한 시간동안 외부전압을 가해준 후, 유체가 채워진 저장소의 무게를 측정하고, 무게변화를 통하여 유량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 마이크로채널의 너비와 깊이 및 외부전압을 변수로 설정하여 마이크로채널에서 유체의 유량변화를 측정하고자 하였다. 마이크로채널의 깊이 50 μm와 100 μm에 대하여 너비는 100 μm, 200 μm 그리고 300 μm로 변화시켰으며, 외부전압은 기존의 실험에서 전

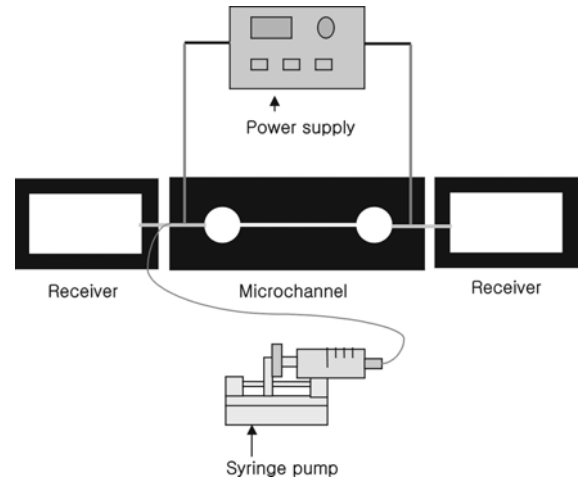


Figure 4. Schematic diagram of experimental apparatus.

류와 전압이 일정한 비를 갖는 0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV 그리고 0.45 kV로 변화시켰다[25].

깊이가 100 μm인 채널에 대하여 채널의 너비변화 및 외부전압 변화에 따른 유량의 변화를 조사하여, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 채널의 너비가 100 μm인 경우, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.00909 μL/s, 0.35 kV일 때 0.01333 μL/s, 0.4 kV일 때 0.01666 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.01904 μL/s를 나타내었다. 이와 같이 동일한 깊이와 너비의 마이크로채널에서 외부전압이 증가할수록 채널 내를 흐르는 유체의 유량이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 외부전압이 증가할수록 전기삼투흐름에서 전기장이 증가하기 때문이다. 채널의 너비가 200 μm인 경우에는, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.03100 μL/s, 0.35 kV일 때 0.03633 μL/s, 0.4 kV일 때 0.04871 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.05833 μL/s를 나타내어, 채널의 너비가 100 μm일 때와 동일한 경향성을 보이고 있다. 채널의 너비가 300 μm인 경우에도, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.04750 μL/s, 0.35 kV일 때 0.05692 μL/s, 0.4 kV일 때 0.07600 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.08600 μL/s를 나타내어 채널의 너비가 100 μm와 200 μm인 경우와 동일한 결과를 나타내었고, 동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유체의 유량이 증가하였다. 이는 채널의 너비가 증가할수록 일정한 유량이 접하는 표면적이 감소하여 유체가 흐를 때 채널 내의 저항이 감소하게 되며, 결과적으로 유량의 증가로 나타난 것으로 판단된다. 위의 결과들은 기존의 연구, 마이크로채널에서의 입자의 속도 [25]를 측정하여 얻은 결과와 비슷한 경향성을 보이고 있다. 본 연구에서는 더 나아가 마이크로채널에서의 깊이의 영향을 알아보기 위하여 채널의 깊이가 50 μm인 마이크로채널을 제작한 후 실험을 실시하여, 채널의 깊이가 100 μm인 마이크로채널의 실험결과와 비교하였다.

깊이가 50 μm인 채널에 대하여 채널의 너비 변화 및 외부전압 변화에 따른 유량 변화를 측정한 결과, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 너비가 100 μm인 경우, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.00188 μL/s, 0.35 kV일 때 0.00415 μL/s, 0.4 kV일 때 0.00560 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.00633 μL/s를 나타내었다. 채널의 너비가 200 μm인 경우, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.00700 μL/s, 0.35 kV일 때 0.01107 μL/s, 0.4 kV일 때 0.01631 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.02080 μL/s를 나타내었다. 채널의 너비가 300 μm인 경우, 외부전압이 0.3 kV일 때 유량은 0.01800 μL/s, 0.35 kV일 때 0.02300 μL/s, 0.4 kV일 때 0.03333 μL/s 그리고 0.45 kV일 때 0.04000 μL/s를 나타내었다. 이

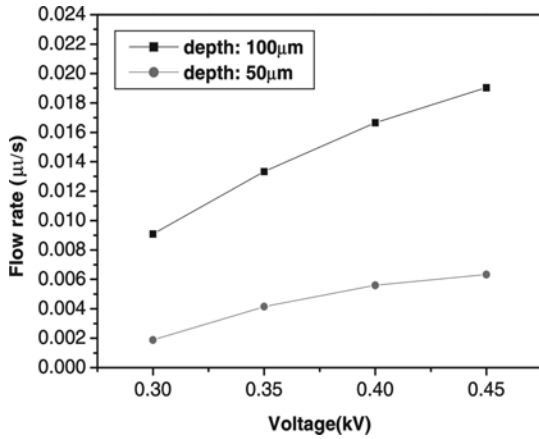


Figure 5. Flow rate vs. voltage in the microchannel with dep as a parameter (width: 100 μm).

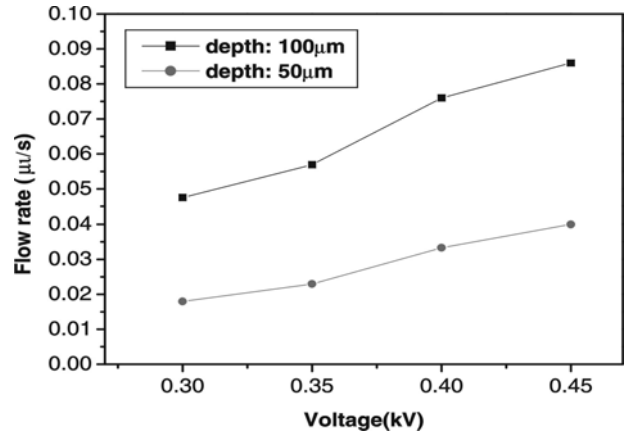


Figure 7. Flow rate vs. voltage in the microchannel with dep as a parameter (width: 300 μm).

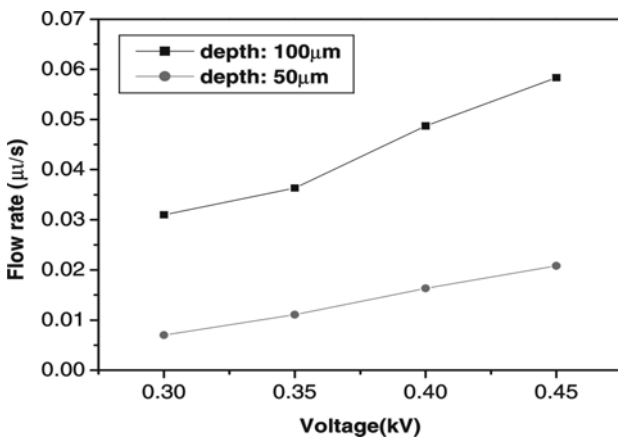


Figure 6. Flow rate vs. voltage in the microchannel with dep as a parameter (width: 200 μm).

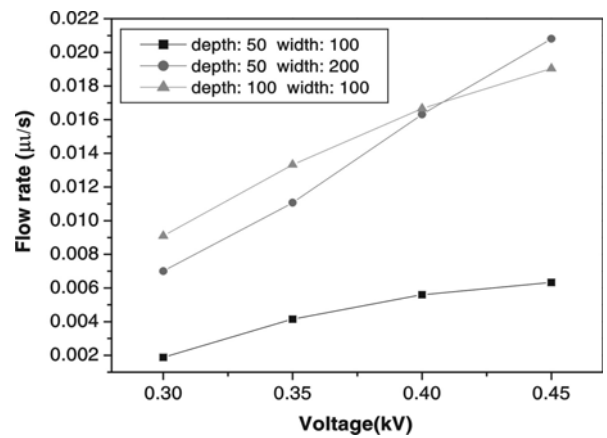


Figure 8. Flow rate vs. voltage in the microchannel with cro sectional area.

는 채널의 깊이가 100 μm 인 경우와 마찬가지로 외부전압의 크기가 증가할수록 유량이 증가하고, 동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유량이 증가하는 결과를 나타내었다.

Figure 5~Figure 7에는 마이크로채널의 너비 100 μm , 200 μm 그리고 300 μm 에 대한 채널의 깊이 50 μm 와 100 μm 의 영향을 나타내고 있다. 동일한 너비에서, 채널의 깊이가 증가함에 따라 유량의 증가를 나타냈으며, 이는 동일한 깊이에서 너비변화에 의해 유량이 증가하는 것과 같은 경우이다. 그리고 외부전압이 0.45 kV일 때 외부전압이 0.3 kV일 때 보다 각각의 채널에서 나타난 유량의 차이는 증가하는 경향을 보였다.

Figure 8에서는 단면적이 동일한 마이크로채널에서 너비와 깊이의 영향을 조사한 결과를 나타내었다. 마이크로채널의 깊이와 너비의 영향을 조사하기 위하여 마이크로채널의 깊이가 50 μm 이고 너비가 100 μm 인 채널을 기준으로 깊이와 너비를 각각 두 배 증가시켜 그 영향을 조사하였다. 각각의 채널은 동일한 단면적을 나타내고 있으나, 유체와 접하는 glass면의 너비차이를 갖게 제작하였다. 실험결과, 각각의 채널은 외부전압이 증가할수록 유량이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 동일한 외부전압에서 상대적인 유량을 비교한 결과, 0.3 kV에서는 glass 면적이 두 배인 마이크로채널에서 낮은 유량을 나타내면서 깊이의 영향이 보다 큰 것으로 나타났다. 0.45 kV에서는 glass 면적이 두 배인 마이크로채널에서의 유량이 보다 높은 값을 나타내었다. 이

는 전기삼투흐름에 큰 영향을 미치는 마이크로채널내의 glass 표면적 증가에 따른 유량변화가 저 전압보다는 고 전압에서 보다 큰 영향을 나타내기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 마이크로채널의 너비변화와 깊이 및 외부전압의 변화에 따른 마이크로채널에서의 유체의 유량변화를 측정하기 위하여, 채널의 깊이 50 μm 와 100 μm 에 대하여 너비를 100 μm , 200 μm 그리고 300 μm 로 하고, 채널의 길이는 40 mm로 하였으며, 직경이 12 mm인 저장공간이 채널의 양 끝에 오도록 제작하였다. 또한 마이크로채널 시스템의 양끝에 탈부착이 가능하도록 제작된 저장소를 연결하여, 저장소의 무게변화를 통하여 유량변화를 측정하였다. 외부전압은 0.3 kV, 0.35 kV, 0.4 kV 그리고 0.45 kV로 변화시켰다. 채널의 너비가 동일한 마이크로채널에서, 외부전압의 세기가 증가할수록 유체의 유량이 증가하였다. 이는 전기삼투흐름에서 외부전압이 증가할수록 전기장이 증가하기 때문이다. 동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유체의 유량이 증가하였고, 이는 채널의 너비가 증가할수록 채널 내의 저항이 감소하기 때문이다. 그리고 동일한 너비의 마이크로채널에서 깊이에 대한 영향은, 깊이가 증가할수록 유체의 유량 변화가 커지는 경향성을 나타냈다. 또한, 저 전압에서는 마이크로채널의

깊이에 대한 영향이 크게 나타났지만, 고 전압에서는 glass의 표면적이 증가함에 따라 마이크로채널의 너비에 대한 영향이 크게 나타났다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 목적기초 연구사업(특정기초 연구사업: R01-2003-000-10224-0)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. M. J. Madou, *Fundamentals in Microfabrication*, CRC press, Boca Raton (1997).
2. A. Manz and H. Becker, *Microsystem Technology in Chemistry and Life Science*, Springer (1998).
3. Q. Kou, I. Yesilyurt, V. Studer, M. Belotti, E. Cambriil, and Y. Chen, *Microelectronic Engineering*, **73**, 876 (2004).
4. T. Vilknier, D. Janasek, and A. Manz, *Anal. Chem.*, **76**, 3373 (2004).
5. Y. Chen and A. P  pin, *Electrophoresis*, **22**, 187 (2001).
6. F. Xue, F. Fore, Y. M. Dunayevskiy, and P. M. Zavaracky, *Anal. Chem.*, **69**, 426 (1997).
7. M. U. Kopp, A. J. DeMello, and A. Manz, *Science*, **280**, 1046 (1998).
8. G. J. M. Bruin, *Electrophoresis*, **21**, 3931 (2000).
9. H. Hillborg, J. F. Ankner, U. W. Gedde, G. D. Smith, H. K. Yasuda, and K. Wikstrom, *Polymer*, **41**, 6851 (2000).
10. Y. Liu, J. C. Fanguy, J. M. Ledsoe, and C. S. Henry, *Anal. Chem.*, **72**, 5939 (2000).
11. X. Ren, M. Bachman, C. Sims, G. P. Li, and N. Allbritton, *J. Chromatography. B*, **762**, 117 (2001).
12. Y. Berdichevsky, J. Khandurina, A. Guttman, and Y. H. Lo, *Sensors and Actuators B*, **97**, 402 (2004).
13. T. Murakami, S. Kuroda, and Z. Osawa, *J. Colloid Interface Sci.*, **202**, 37 (1998).
14. S. L. R. Barker, D. Ross, M. J. Tarlov, M. Gaitan, and L. E. Locascio, *Anal. Chem.*, **72**, 5925 (2000).
15. S. Hu, X. Ren, M. Bachman, C. E. Sims, G. P. Li, and N. Allbritton, *Anal. Chem.*, **74**, 4117 (2002).
16. M. N. Kozicki, P. Maroufkhani, and M. Mitkova, *Superlattices and Microstructures*, **34**, 467 (2003).
17. R. M. McCormick, *Anal. Chem.*, **60**, 2322 (1988).
18. M. A. Hayes and A. G. Ewing, *Anal. Chem.*, **64**, 512 (1992).
19. D. Belder, K. Elke, and H. Husmann, *J. Chromatography. A*, **868**, 63 (2000).
20. Y. Joo, K. Dieu, and C. J. Kim, *Proc. MEMS'95*, 362 (1995).
21. J. J. Rebecca, M. F. Tamara, G. Reza, A. S. Martin, and F. J. Klavs, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **11**, 263 (2001).
22. N. A. Polson and M. A. Hayes, *Anal. Chem.*, **72**, 1088 (2000).
23. D. Sinton, C. E. Canseco, L. Ren, and D. Li, *J. Colloid Interface Sci.*, **254**, 184 (2002).
24. C. D. Meinhart, S. T. Wereley, and J. G. Santiago, *Exp. in Fluids*, **27**, 414 (1999).
25. J. Y. Kim, H. S. Lee, J. S. Kim, and Y. W. Rhee, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **16**, 238 (2005).