

## 외부전압 및 너비 변화에 따른 마이크로채널의 유량 변화

김진용, 이효송, 김정수, 이영우  
충남대학교 화학공학과

### The Flow Rate Change in the Microchannel with Various External Voltages and Widths

Kim Jin Yong, Lee Hyo Song, Kim Jeong Soo, Rhee Young Woo

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

#### 1. 서론

최근에 마이크로시스템의 제작이 분석화학, 생명공학 및 임상화학에 적용됨에 따라 이를 위해 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-3]. 기존에는 유리, 석영 또는 실리콘 등의 재료를 사용한 마이크로시스템의 제작이 주로 이루어졌으나, 고가의 재료이면서 제작에 많은 시간이 필요하다는 단점으로 인하여, 다른 물질들에 대한 관심과 연구가 이루어졌다[1, 2, 4]. 특히 PDMS(polydimethylsiloxane)를 이용한 soft lithography는 값싸고 제작이 용이하여, 이를 이용한 마이크로시스템의 제작이 활발하게 이루어지고 있다[5-9]. 마이크로채널에서 발생하는 유체의 흐름은 전기삼투 흐름으로써, 채널 양쪽에 걸리는 전압에 의하여 음으로 하전된 PDMS 표면에 양이온들이 달라붙고, 이로 인하여 전기이중층이 형성되어 전기삼투 흐름이 음극 쪽으로 형성된다[8]. 전기삼투 흐름은 채널 양쪽에 걸리는 외부전압의 세기를 조절하거나, 채널 내에 흐르는 유체의 pH를 조절함으로써 그 흐름을 제어할 수 있다[8, 10, 11].

본 연구에서는 외부전압 및 채널의 너비에 따른 유량 변화를 조사하기 위하여, 채널의 너비를 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m, 300 $\mu$ m로 달리하여 마이크로채널을 제작하였다. 유체의 유량 변화를 측정하기 위하여 buffer solution을 채널 내에 주입하였고, 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV, 0.4kV로 달리하여 유량을 측정하였다.

#### 2. 실험 및 실험 방법

Soft lithography를 이용한 마이크로채널의 제작에서 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 mask를 제작하는 것이다. Mask는 원하는 패턴의 디자인을 고해상도(10,000 DPI)의 프린터를 사용하여 제작하였다. 마이크로채널의 깊이는 100 $\mu$ m, 길이는 40mm로 하였으며, 채널의 너비는 100 $\mu$ m, 200 $\mu$ m 그리고 300 $\mu$ m 로 달리하여 제작하였다. 또한 채널의 양쪽 끝에 adapter를 꽂을 수 있도록 가로와 세로가 10mm인 저장공간을 두었으며, 채널 내에 유체가 흐르는 시간을 고려하여 유량을 측정하는데 용이하도록 저장공간을 크게 디자인하였다. Fig. 1은 soft lithography을 이용한 마이크로채널의 제작방법을 간단히 보여주고, Fig. 2는 생성된 패턴의 SEM 사진을 보여주고 있다. Table 1은 실리콘 웨이퍼 위에 패턴을 생성하는 과정을 나타내고 있다. 마이크로채널 안에 주입하는 유체로는 pH가 7.0인 완충용액(Weilheim, WTW pH 7.0, Technical buffer 50ml)을 사용하였고, 이는 전기삼투 흐름에서 pH변화에

따른 영향을 없애기 위해서이다. 각각의 마이크로채널의 저장공간에 adapter를 연결하여 채널에서 흘러나오는 유체를 receiver에 저장하고, receiver의 양을 측정하여 유량을 조사하였다.

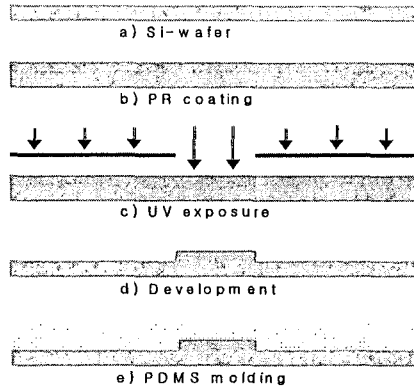


Fig. 1. Fabrication process by soft lithographic method.

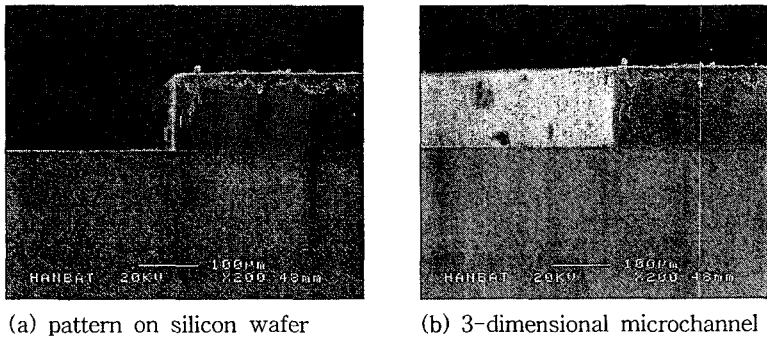


Fig. 2. SEM photographs of the microchannel.

Table 1. Soft Lithographic Method for the SU-8

Step	Process	Method
1	Substrate pretreatment	to treat with HMDS(hydromethylidisiloxane) for 10 minutes.
2	Coating	1st step: 500rpm, 30sec, 2nd step: 2,000rpm, 30sec
3	Soft baking	20 minutes at 65°C, 50 minutes at 95°C
4	Exposure	180 sec
5	Post exposure baking	1 minute at 65°C, 12 minutes at 95°C
6	Development	to develop with the SU-8 developer for 10 minutes
7	Rinsing & drying	to rinse with IPA(isopropyl alcohol), to dry with a gentle stream of nitrogen

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 외부전압과 채널의 너비를 변수로 설정하여 마이크로채널에서의 유량 변화를 측정하고자 하였다. 따라서 유량 변화를 측정하기 이전에, 마이크로채널에서 외부전압의 변화에 따른 전류의 변화를 측정하였다. Fig. 3에는 너비가 300 $\mu\text{m}$ 인 마이크로채널에서의 외부전압과 전류 사이의 관계를 나타냈었다. 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV 그리고 0.4kV로 변화시켰을 때에는 채널 내부에 아무런 변화 없이 유체의 유량 변화를 측정할 수 있었다. 그러나 0.5kV 이상에서는 옴의 법칙(Ohm's law)을 벗어나 전류의 값이 크게 증가하였다. 이는 과전압에 의해 채널 내부의 물성이 바뀌어 전류의 값이 크게 증가되는 것으로 사료된다. 따라서 본 실험에서는 전압과 전류의 비가 일정하게 나타난 0.1~0.4kV까지 외부전압을 변화시켰다. Table 2에는 채널의 너비에 대하여 0.4kV까지의 외부전압 변화에 따른 전류의 변화를 나타내었으며, 외부전압이 증가할수록 마이크로채널에서의 전류가 유사하게 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다.

전기삼투에서 유체의 속도는 아래의 Helmholtz-Smoluchowski Equation으로 나타낼 수 있다[12-15]. 식(1)에 의하면, 전기이중층의 두께가 채널 크기에 비해 매우 작고, 유체의 속도( $u$ )는 벽면에서 미끄러지게 된다는 조건을 만족할 경우에 전기장( $E$ )에 비례하여 증가한다. 단, 유체의 유전율( $\epsilon$ )과 제타전위( $\zeta$ ) 그리고 유체의 점도( $\mu$ )가 일정한 경우이다.

$$u = \epsilon E \zeta / \mu \quad (1)$$

식 (1)에 따르면, 유체의 속도는 외부전압에 정비례하여 증가하므로, 외부전압을 0.1kV에서 0.2kV, 0.3kV 그리고 0.4kV로 변화시키면 유체의 속도도 각각 2배, 3배 그리고 4배로 증가할 것이다. 그러나 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 유체의 속도는 외부전압에 정비례하여 증가하지 않는다. 이는 외부전압의 세기가 증가할수록 계면에서의 전하밀도가 증가하게 되고, 이로 인하여 전기이중층이 압축되어 표면전위가 증가하고, 그 결과 제타전위의 값이 증가하기 때문인 것으로 판단된다[13-15]. 그리고 외부전압이 동일할 때, 채널의 너비에 따라서 유체의 속도가 다른 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4를 자세히 살펴보면, 외부전압이 0.1kV인 경우, 채널 너비가 가장 작은 100 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0006 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 작게 나타났으며, 채널 너비가 200 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0021 $\mu\text{l/s}$ 로 나타났으며, 채널의 너비가 가장 큰 300 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0045 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 크게 나타났다. 외부전압이 0.2kV인 경우, 채널 너비가 가장 작은 100 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0027 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 작게 나타났으며, 채널 너비가 200 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0074 $\mu\text{l/s}$ 로 나타났으며, 채널의 너비가 가장 큰 300 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0152 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 크게 나타났다. 외부전압이 0.3kV인 경우, 채널 너비가 가장 작은 100 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0089 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 작게 나타났으며, 채널 너비가 200 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0194 $\mu\text{l/s}$ 로 나타났으며, 채널의 너비가 가장 큰 300 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0299 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 크게 나타났다. 외부전압이 0.4kV인 경우, 채널 너비가 가장 작은 100 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0177 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 작게 나타났으며, 채널 너비가 200 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0300 $\mu\text{l/s}$ 로 나타났으며, 채널의 너비가 가장 큰 300 $\mu\text{m}$ 에서 유량은 0.0389 $\mu\text{l/s}$ 로 가장 크게 나타났다.

위의 결과에서 동일한 외부전압을 걸어주었을 때, 채널의 너비가 증가할수록 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 채널의 너비가 증가할수록 채널 내에서 저항이 감소하게 되고, 이로 인하여 유량이 보다 크게 나타나는 것으로 사료된다.

Table 2. Current of the Microchannel with External Voltages and Widths

External voltage	Width		
	100 $\mu\text{m}$	200 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$
0.1 kV	0.06 mA	0.08 mA	0.09 mA
0.2 kV	0.12 mA	0.16 mA	0.18 mA
0.3 kV	0.19 mA	0.25 mA	0.28 mA
0.4 kV	0.25 mA	0.35mA	0.39 mA

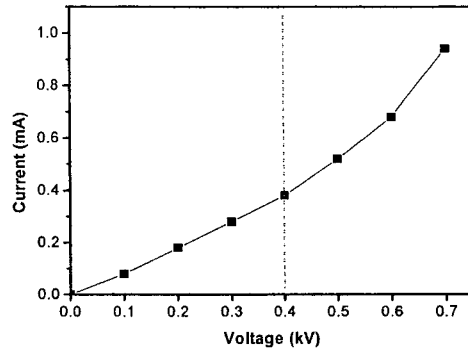


Fig. 3. Current vs. Voltage in the microchannel (width: 300 $\mu\text{m}$ ).

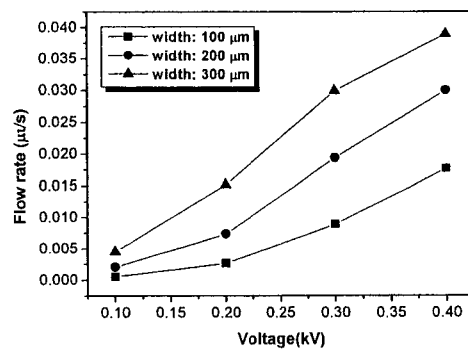


Fig. 4. Flow rate vs. Voltage in the microchannels.

#### 4. 결론

본 연구에서는 외부전압 및 채널의 너비 변화에 따른 마이크로채널에서의 유량 변화를 측정하기 위하여, 채널의 너비를 100 $\mu\text{m}$ , 200 $\mu\text{m}$ , 300 $\mu\text{m}$ 으로 하고 길이는 40mm 그리고 가로와

세로가 10mm인 저장소가 채널의 양끝에 오도록 제작하였다. pH 7.0인 완충용액을 사용하여, 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV 그리고 0.4kV로 변화시키면서 유량을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 외부전압의 세기가 증가할수록 계면에서의 전하밀도가 증가하게 되고, 이로 인하여 전기 이중층이 압축되어 표면전위가 증가하고, 그 결과 제타전위의 값이 증가한다. 그 결과 채널 너비가 동일하더라도 외부전압이 증가할수록 유량이 비선형적으로 증가하였다.

(2) 동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유량이 증가하였다. 이는 채널의 너비가 증가할수록 채널 내의 저항이 감소하게 되고, 이로 인하여 유량이 크게 나타나는 것으로 사료된다.

## 감사

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

## 5. 참고문헌

1. Madou, M. J.: "Fundamentals in Microfabrication" CRC press, BocaRaton (1997).
2. Manz, A. and Becker, H.: "Microsystem Technology in Chemistry and Life Science" Springer (1998).
3. Kou, Q., Yesilyurt, I., Studer, V., Belotti, M., Cambil, E. and Chen, Y.: "On-chip optical components and microfluidic systems", *Microelectronic Engineering*, Vol. 73-74, 876 (2004).
4. Kopp, M. U., Demello, A. J. D. and Manz, A.: "Chemical Amplification: Continuous-Flow PCR on a chip", *Science*, Vol. 280, 1046-1048 (1998).
5. Berdichevsky, Y., Khandurina, J., Guttman, A. and Lo, Y. H.: "UV/ozone Modification of Poly(dimethylsiloxane) Microfluidic Channels", *Sensors and Actuators B*, Vol. 97, 402-408 (2004).
6. Hillborg, H., Ankner, J. F., Gedde, U. W. Smith, G. D., Yasuda, H. K. and Wikstrom, K.: "Crosslinked Polydimethylsiloxane Exposed to Oxygen Plasma Studied by Neutron Reflectometry and Other Surface Specific Techniques", *Polymer*, Vol. 41, 6851-6863 (2000).
7. Murakami, T., Kuroda, s. and Osawa, Z.: "Dynamics of Polymeric Solid Surfaces Treated with Oxygen Plasma: Effect of Aging Media after Plasma Treatment", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 202, 37-44 (1998).
8. Liu, Y., Fanguy, J. C., Bledsoe, J. M. and Henry, C. S.: "Dynamic Coating Using Polyelectrolyte Multilayers for Chemical Control of Electroosmotic Flow in Capillary Electrophoresis Microchips", *Anal. Chem.*, Vol. 72, 5939-5944 (2000).
9. Ren, X., Bachman, M. Sims, C., Li, G. P. and Allbritton, N.: "Electroosmotic Properties of Microfluidic Channels Composed of Poly(dimethylsiloxane)", *J. Chromatography. B*, Vol. 762, 117-125 (2001).
10. Hayes, M. A. and Ewing, A. G.: "Electroosmotic Flow Control and Monitoring with an Applied Radial Voltage for Capillary Zone Electrophoresis", *Anal. Chem.*, Vol. 64,

512-516 (1992).

11. Belder, D., Elke, K. and Husmann, H.: "Influence of pH-value of Methanolic Electrolytes on Electroosmotic Flow in Hydrophilic Coated Capillaries", *J. Chromatography. A*, Vol. 868, 63-71 (2000).
12. Lee, C. S., Blanchard, W. C. and Wu, C. T.: "Direct Control of the Electroosmosis in Capillary Zone Electrophoresis by Using an External Electric Field", *Anal. Chem.*, Vol. 62, 1550-1552 (1990).
13. Lee, C. S., Mcmanigill, D., Wu, C. T. and Patel, B.: "Factors affecting direct control of electroosmosis using an external electric field in capillary electrophoresis", *Anal. Chem.*, Vol. 63, 1519 (1991).
14. Oddy, M. H. and Santiago, J. G.: "A Method for Determining Electrophoretic and Electroosmotic Mobilities Using AC and DC Electric Field Particle Displacements", *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 269, 192-204 (2004).
15. Probstein, R. F.: "Physicochemical Hydrodynamics" John Wiley and Sons, Inc.(1994).
16. Kim, J. D.: "Interface Phenomenology" Aruka (2000).