

마이크로채널의 접촉각, 너비 그리고 외부전압 변화에 따른
유체의 속도변화 측정

이효송 · 김진용 · 김정수 · 이영우
충남대학교 화학공학과

The measurement of fluid velocity change in the microchannel
with various contact angle, width and external voltage.

Lee Hyo-Song, Kim Jin-Yong, Kim Jeong-Soo, Rhee Young Woo[†]
Department of Chemical Engineering, Chungnam National University,

1. 서 론

생물학적인 분리와 화학적인 분석을 위한 마이크로시스템의 제작에는 값싸고 제작이 용이한 PDMS (polydimethylsiloxane)가 많이 이용되고 있다. PDMS의 표면은 높은 소수성을 나타내므로, 산소 플라즈마를 이용한 표면처리를 통하여 친수성으로 바꾸어준다. 마이크로채널에서는 채널 양쪽에 걸리는 전압에 의하여 음으로 하전된 PDMS 표면에 양이온들이 달라붙고, 이로 인하여 전기이중층이 형성되어 전기삼투 흐름이 음극 쪽으로 형성된다[1-8]. 특히 전기삼투 흐름은 채널 양쪽에 걸리는 외부전압의 세기를 조절하거나, 채널 내에 흐르는 유체의 pH를 조절함으로써 그 흐름을 쉽게 제어할 수 있다. 전기삼투에 의하여 흐르는 유체의 유속을 직접적으로 측정하는 방법은 아직 보고된 바 없으며, 주로 마이크로채널 내를 흐르는 유체에 형광물질이나 형광입자를 투입한 후, 형광현미경을 통하여 유체의 속도를 측정할 수 있다[9-12]. 일정한 외부전압을 가하였을 때, 마이크로채널 내의 입자들은 각각의 전하량에 따라서 서로 다른 이동도를 갖게 되며, 이를 이용하여 동일한 물질의 분리가 가능하다[10-13].

본 연구에서는 PDMS의 접촉각 및 마이크로채널의 너비 그리고 외부전압이 유체의 흐름에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위하여, PDMS의 표면을 산소 플라즈마를 이용하여 처리하였으며, 마이크로채널의 너비를 100 μm , 200 μm , 300 μm 로 변화시켰다. 마이크로채널에서 유체의 속도를 측정하기 위하여 직경이 3 μm 인 전기적인 성질을 띠지 않는 검은색의 PS(polystyrene) 입자를 유체 내에 주입하였으며, 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV, 0.4kV로 달리하여 그 때의 입자의 속도변화를 조사하였다.

2. 실 험

2-1. 마이크로채널의 제작

마이크로채널을 제작에 사용할 마스크를 제작하기 위하여, 고해상도(10,000 DPI)의 프린터를 사용하여 원하는 디자인을 프린트하였다. 마이크로채널의 깊이는 100 μm , 채널의 길이는 40mm, 그리고 채널의 양쪽 끝에 튜브와 연결하는 연결관을 꽂을 수 있도록 직경 7mm인 원 모양의 저장공간을 두었다. 표 1에는 실리콘 웨이퍼 위에 패턴을 생성하는 과정을 나타내었다. 원하는 패턴이 웨이퍼 위에 완성되면 PDMS를 이용하여 본을 뜨게 된다. 이 때 진공건조기를 사용하여 0~100mmHg 정도의 압력에서 1시간 정도 반응시키면 PDMS 내에 존재하는 기포가 완전히 제거된다. 그 후에 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 정도 고형화시키고 웨이퍼에서 떼어내면 PDMS 패턴이 형성되고, 유리판에 접합시켜 생성하고자 하는 마이크로채널을 완성할 수 있다. 본 연구에서는 접촉각의 변화에 따른 유체의 속도변화를 측정하기 위하여, 유리판에 접합시키기 직전에 PDMS의 표면을 산소 플라즈마를 사용하여 처리하였다. PDMS의 접촉각은 접촉각측정기(KYOWA INTERFACE, CA-A, FACE CONTACT ANGLE)를

사용하여 측정하였으며, 마이크로채널의 양 끝에 연결관과 튜브를 연결하면 마이크로채널 시스템이 완성된다.

Table 1. Photolithography method for the SU-8 photoresist

Step	Process	Method
1	Substrate pretreatment	treat with HMDS(hydromethyldisiloxane) for 10 minutes.
2	Coating	step 1: 500rpm, 30sec, step 2: 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	develop with the SU-8 developer for 10 minutes
7	Rinsing & drying	rinse with IPA(isopropyl alcohol), dry with a gentle stream of nitrogen

2-2. 실험 방법

유체로는 pH가 7.0인 완충용액(Weilheim, WTW pH 7.0, Technical buffer 50ml)을 사용하였다. 이는 전기삼투 흐름에서 pH변화에 따른 영향을 없애기 위해서이다. 일반적으로 마이크로채널 내에서 유체의 속도를 측정하기 위해서 형광물질이나 형광입자를 사용하지만, 본 연구에서는 화상분석시스템(마이프로네트, BMI 150MHz, CP700D)을 이용하여 유체의 유속을 측정하고자 전기적인 성질을 띠지 않는 직경이 3 μ m인 검은 색의 PS(polystyrene) 입자를 투입하였다. PS 입자는 단위 부피에 대하여 일정한 개수를 갖도록 하였으며, 그 값은 약 140개/ μ l이다. 완충용액은 마이크로시린지를 사용하여 마이크로채널의 내부로 주입된다. 유체를 주입한 후, 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV, 0.4kV로 달리하여 입자의 속도를 측정하였다. 그림 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

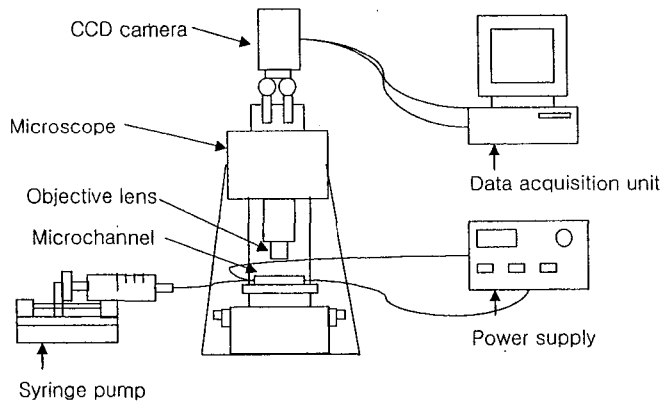


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

입자의 흐름은 우선 현미경과 연결된 컴퓨터를 사용하여 동영상으로 저장하고, 그 후에

미디어 편집기를 통하여 실제보다 느린 속도로 재생 시킨다. 재생 중에 일정한 시간을 두고 정지화면을 저장하고, 그 후에 저장된 정지화면들을 비교하여 입자의 속도를 계산할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 PDMS의 접촉각과 채널의 너비 그리고 외부전압을 변수로 설정하여 마이크로채널에서 유체의 속도변화를 측정하고자 하였다. 이를 위하여, 전기적인 성질을 띠지 않는 검은색의 PS 입자를 사용하여 유체의 속도를 측정하였다. 아래의 식(1)에 나타난 바와 같이 유체 내에 입자가 존재하고 외부전압에 의하여 유체가 흐를 경우, 입자의 속도(U)는 전기삼투에 의한 속도(U_{eo})와 전기영동에 의한 속도(U_{ep})의 합으로 나타난다[12, 14]. 그러므로 표면에 전기적인 성질을 띠지 않는 PS 입자를 사용하여 전기영동에 의한 속도 항을 없애고, 전기삼투에 의한 유체의 속도를 구하고자 하였다.

$$U = U_{eo} + U_{ep} \quad (1)$$

전기삼투에서 유체의 속도는 아래의 Helmholtz-Smoluchowski 식으로 나타낼 수 있다 [13, 15-17]. 식(2)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(ϵ)과 제타전위(ζ) 그리고 유체의 점도(μ)가 일정한 경우이다.

$$u = \epsilon E \zeta / \mu \quad (2)$$

식(2)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 그림 2, 그림3 그리고 그림 4에 나타난 바와 같이, 유체의 속도는 외부전압에 정비례하여 증가하지 않는다. 이는 외부전압의 세기가 증가할수록 계면에서의 전하 밀도가 증가하게 되고, 이로 인하여 전기이중층이 압축되어 표면전위가 증가하고, 그 결과 제타전위의 값이 변화하기 때문인 것으로 판단된다[15-17].

고체면 위에 액적을 떨어뜨렸을 때, 액적이 완전히 퍼지지 않을 경우에는 접촉하는 면과 일정한 각 θ 를 이루게 되는데, 이 각은 액체-고체 접촉에서 특성적인 값으로 접촉각(contact angle)이라 부른다. 아래의 Young-Dupre 식에 의하면 부착일(W_A)은 접촉하는 액체와 고체가 분리될 때의 자유에너지로써 접촉각과 액체의 표면자유에너지(γ_L)의 곱에 비례한다 [15-17].

$$W_A = \gamma_L(1 + \cos \theta) \quad (3)$$

즉, 접촉각이 0°에 근접할수록 보다 큰 부착일이 가해진 것으로써, 액체와 고체가 잘 부착되어 있으며, 액체와 고체를 분리하는 데에는 보다 많은 에너지가 필요하다. 반대로 접촉각이 0°에서 멀어질수록 액체와 고체는 잘 부착되어있지 않으며, 액체와 고체를 분리하는 데에는 보다 적은 에너지가 필요할 것이다. 마이크로채널에서 전기삼투에 의한 흐름을 유도하기 위해서는 유체와 PDMS 표면이 부착하여 표면에 전기이중층이 생성되어야 하며, 전기이중층은 유체와 PDMS의 부착정도에 따라서 그 두께를 달리할 것이다. 그리고 전기이중층의 두께차이는 표면전위와 제타전위의 차이로 나타나며, 이는 결과적으로 동일한 외부전압에서 유체의 속도차이를 가져오는 것으로 사료된다. 부착일(W_A)은 작용기가 많을수록 증가하고, 산소 플라즈마로 처리된 표면에 생성되는 작용기의 양을 나타낸다[6]. 실제로 소수성

인 PDMS 표면을 산소 플라즈마로 처리하면, 작용기가 생성되고, 그 표면이 친수성으로 전환되며, 접촉각이 줄어든다는 것은 이미 많은 연구에서 보고되고 있다[2, 5, 6, 8, 18, 19].

그림 2에 나타낸 바와 같이, 외부전압이 0.1kV인 경우, 접촉각이 가장 큰 105°에서 유체의 속도는 62 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 접촉각이 가장 작은 19°에서 유체의 속도는 292 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.2kV인 경우, 접촉각이 가장 큰 105°에서 유체의 속도는 254 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 접촉각이 가장 작은 19°에서 유체의 속도는 936 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.3kV인 경우, 접촉각이 가장 큰 105°에서 유체의 속도는 460 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 접촉각이 가장 작은 19°에서 유체의 속도는 1,273 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.4kV인 경우, 접촉각이 가장 큰 105°에서 유체의 속도는 579 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 접촉각이 가장 작은 19°에서 유체의 속도는 1,775 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 위의 결과로부터 동일한 외부전압을 걸어주었을 때, 접촉각의 크기가 작은 마이크로채널에서 유체의 속도가 빠른 것을 알 수 있다. 그림 3과 그림 4에서도 그림 2와 마찬가지로, 동일한 외부전압에서 접촉각의 크기가 작은 경우에 유체의 속도가 보다 빠른 것으로 나타났다. 이는 산소의 플라즈마 처리로 인하여 접촉각이 감소하게 되고 부착일이 증가하게 됨으로써 전기 이중층의 두께와 제타전위가 변화하게 되며, 동일한 외부전압에서 유체의 속도 차이를 가져오는 것으로 사료된다.

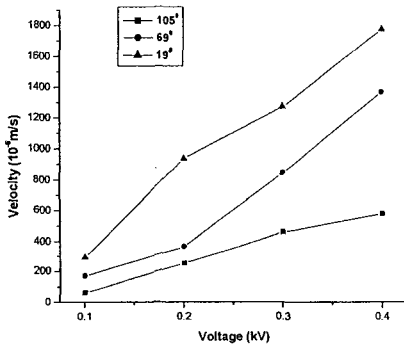


Fig. 2. Voltage vs. velocity in the microchannel with various contact angles (width: 300 μm).

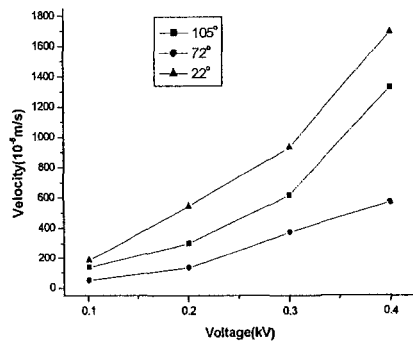


Fig. 3. Voltage vs. velocity in the microchannel with various contact angles (width: 200 μm).

그림 5에는 채널의 너비변화에 따른 동일한 외부전압에서 유체의 속도변화를 나타내었으며, PDMS의 접촉각은 105°이다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, 외부전압이 0.1kV인 경우, 채널의 너비가 100 μm 일 때 유체의 속도는 36 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 채널의 너비가 200 μm 일 때 49 $\mu\text{m/s}$ 그리고 채널의 너비가 300 μm 일 때 유체의 속도는 62 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.2kV인 경우, 채널의 너비가 100 μm 일 때 유체의 속도는 114 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 채널의 너비가 200 μm 일 때 134 $\mu\text{m/s}$ 그리고 채널의 너비가 300 μm 일 때 유체의 속도는 254 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.3kV인 경우, 채널의 너비가 100 μm 일 때 유체의 속도는 311 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 채널의 너비가 200 μm 일 때 375 $\mu\text{m/s}$ 그리고 채널의 너비가 300 μm 일 때 유체의 속도는 460 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 외부전압이 0.4kV인 경우, 채널의 너비가 100 μm 일 때 유체의 속도는 511 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 느리게 나타났으며, 채널의 너비가 200 μm 일 때 571 $\mu\text{m/s}$ 그리고 채널의 너비가 300 μm 일 때 유체의 속도는 589 $\mu\text{m/s}$ 로 가장 빠르게 나타났다. 위의 결과로부터, 동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유체의 속도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 채널의 너비가 증가

할수록 채널 내의 저항이 감소하여, 유체의 속도가 증가하는 것으로 사료된다.

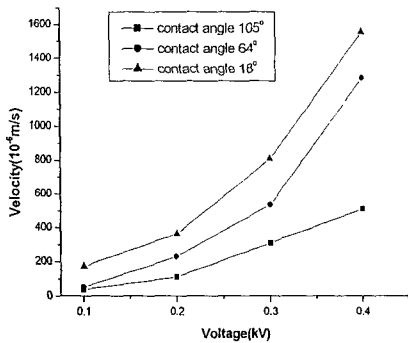


Fig. 4. Voltage vs. velocity in the microchannel with various contact angles (width: 100 μm).

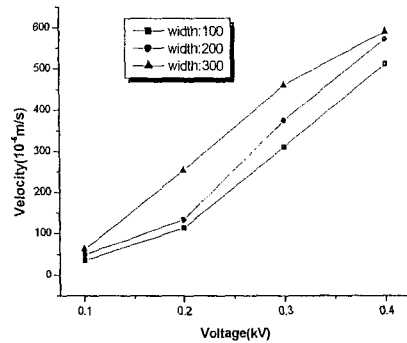


Fig. 5. Voltage vs. velocity in the microchannel with various channel widths (contact angle: 105°).

결론

본 연구에서는 PDMS의 접촉각 및 채널의 너비를 변화시켰을 때 외부전압의 변화에 따른 마이크로채널에서의 유체의 속도 변화를 측정하고자 하였다. 제작된 채널의 너비는 300 μm, 200 μm 그리고 100 μm 로 하였다. pH 7.0인 완충용액과 3 μm의 검은색 PS 입자를 사용하여, 외부전압을 0.1kV, 0.2kV, 0.3kV 그리고 0.4kV로 변화시키면서 유체의 유속을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

외부전압의 세기가 증가할수록 계면에서의 전하밀도가 증가하게 되고, 이로 인하여 전기 이중층이 압축되어 표면전위가 증가하고, 그 결과 제타전위의 값이 증가한다. 그 결과 동일한 접촉각을 갖는 PDMS에 대하여, 외부전압이 증가할수록 유체의 속도가 비선형적으로 증가하였다.

동일한 외부전압에서 PDMS의 접촉각이 가장 작은 경우에 유체의 속도가 가장 빠르게 나타났다. 이는 PDMS의 플라즈마 처리에 의하여 접촉각이 감소하게 되고 부착일이 증가하게 됨으로써, 전기 이중층의 두께에 영향을 미치고 제타전위의 변화를 초래하게 된다. 따라서 동일한 외부전압에서 접촉각이 작은 경우에, 높은 부착일과 높은 제타전위로 인하여 보다 높은 유체의 속도를 나타내는 것으로 사료된다.

동일한 외부전압에서 채널의 너비가 증가할수록 유체의 속도가 증가하였다. 이는 채널의 너비가 증가할수록 채널 내에서 저항이 감소하게 되고, 이로 인하여 유체의 속도가 보다 빠르게 나타나는 것으로 사료된다.

감사

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

참고문헌

1. Madou, M. J.: "Fundamentals in Microfabrication", CRC press, Boca Raton (1997).
2. Manz, A. and Becker, H.: "Microsystem Technology in Chemistry and Life Science", Springer (1998).

3. Kopp, M. U., Demello, A. J. D., Manz, A.: "Chemical Amplification: Continuous-Flow PCR on a chip", *Science*, **280**, 1046-1048 (1998).
4. Berdichevsky, Y., Khandurina, J., Guttman, A., Lo, Y. H.: "UV/ozone Modification of Poly(dimethylsiloxane) Microfluidic Channels", *Sensors and Actuators B*, **97**, 402-408 (2004).
5. Hillborg, H., Ankner, J. F., Gedde, U. W. Smith, G. D., Yasuda, H. K., Wikstrom, K.: "Crosslinked Polydimethylsiloxane Exposed to Oxygen Plasma Studied by Neutron Reflectometry and Other Surface Specific Techniques", *Polymer*, **41**, 6851-6863 (2000).
6. 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.*, **202**, 37-44 (1998).
7. Liu, Y., Fanguy, J. C., Bledsoe, J. M., Henry, C. S.: "Dynamic Coating Using Polyelectrolyte Multilayers for Chemical Control of Electroosmotic Flow in Capillary Electrophoresis Microchips", *Anal. Chem.*, **72**, 5939-5944 (2000).
8. Ren, X., Bachman, M. Sims, C., Li, G. P., Allbritton, N.: "Electroosmotic Properties of Microfluidic Channels Composed of Poly(dimethylsiloxane)", *J. Chromatography. B*, **762**, 117-125 (2001).
9. Hayes, M. A. and Ewing, A. G.: "Electroosmotic Flow Control and Monitoring with an Applied Radial Voltage for Capillary Zone Electrophoresis", *Anal. Chem.*, **64**, 512-516 (1992).
10. Belder, D., Elke, K., Husmann, H.: "Influence of pH-value of Methanolic Electrolytes on Electroosmotic Flow in Hydrophilic Coated Capillaries", *J. Chromatography. A*, **868**, 63-71 (2000).
11. Polson, N. A. and Hayes, M. A.: "Electroosmotic Flow Control of Fluids on a Capillary Electrophoresis Microdevice Using an Applied External Voltage", *Anal. Chem.*, **72**, 1088-1092 (2000).
12. Sinton, D., Canseco, C. E., Ren, L., Li, D.: "Direct and Indirect Electroosmotic Flow Velocity Measurements in Microchannels", *J. Colloid Interface Sci.*, **254**, 184-189 (2002).
13. Lee, C. S., Blanchard, W. C., Wu, C. T.: "Direct Control of the Electroosmosis in Capillary Zone Electrophoresis by Using an External Electric Field", *Anal. Chem.*, **62**, 1550-1552 (1990).
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.*, **269**, 192-204 (2004).
15. Probstein, R. F.: "Physicochemical Hydrodynamics" John Wiley and Sons, Inc. (1994).
16. Kim, J. D.: "Interface Phenomenology", Aruka (2000).
17. Ryu, D. I., Kim, J. H., Shin, Y. S.: "Interface Science", Chonnam National Univ. (1998).
18. Oláh, A., Hillborg, H., Vancso, J.: "Hydrophobic Recovery of UV/ozone Treated Poly(dimethylsiloxane): Adhesion Studies by Contact Mechanics and Mechanism of Surface Modification", *Appl. Surface Science* (in press).
19. Kasemura, T., Takahashi, S., Nakane, N., Maefawa T.: "Surface Dynamics for Poly(vinyl alkylate)s via Dynamic Contact Angle and Adhesion Tension Relaxation", *Polymer*, **37**(16), 3659-3664 (1996).