

PDMS 표면특성에 따른 비균일계 마이크로채널의 유속 변화

노순영, 이효송[†], 김기호, 최재호, 유재근[†], 윤수경[§], 이영우^{*}

충남대학교 공과대학 화학공학과
305-764 대전광역시 유성구 궁동 220

[†]한국환경자원공사
404-708 인천광역시 서구 경서동 종합 환경 연구단지 내

[†]한국신발 · 피혁연구소
614-100 부산광역시 부산진구 당감동 786-50

[§]아주대학교 공학교육혁신센터
443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5번지

(2007년 8월 31일 접수, 2007년 9월 15일 채택)

Flow Rate Changes in the Heterogeneous Rectangular Microchannels with Different Hydrophilicity for the PDMS Bottom Surface

Soon Young Noh, Hyo Song Lee[†], Ki Ho Kim, Jae Ho Choi, Jae Keun Yu[†],
Soo Kyung Yoon[§] and Young Woo Rhee^{*}

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

[†]Korea Environment & Resources Corporation, Incheon 404-708, Korea

[†]Korea Institute of Footwear and Leather Technology, Pusan 614-100, Korea

[§]Ajou University, Suwon 443-749, Korea

(Received for review August 31, 2007; Revision accepted September 15, 2007)

요 약

본 연구에서는 표면특성에 따른 비균일계 마이크로채널에서의 유속 변화를 조사하였다. 비균일계 마이크로채널은 PDMS와 soft lithography를 사용하여 제작하였고, 마이크로채널의 내부 표면 중 아랫면만을 allyl alcohol로 증착하여 친수성을 띠게 하였다. 채널의 길이는 10, 20, 30 mm, 너비는 100, 200, 300 μm 로 각각 제작하였으며, 채널 내 전기영동에 의한 흐름을 생성하기 위해 외부전압을 가해주었다. 그 결과 동일한 세기의 전기장과 밀면의 친수성 정도가 동일할 때 유속은 같았다. 이는 이론적 결과에 부합하고, 연구가 신뢰성이 있다는 것을 뒷받침할 수 있었다. 같은 친수성을 갖는 밀면일 때 채널의 너비가 증가할수록 유속도 증가하고, 친수성 정도가 큰 채널이 작은 채널보다 유속이 빨랐다. 이 결과는 밀면의 친수성 정도에 따라 채널 유속을 조절할 수 있다는 것을 의미한다.

주제어 : PDMS, 전기영동, 비균일계 마이크로채널, 친수성, 진공플라즈마

Abstract – This study investigated the flow rate changes of the heterogeneous rectangular microchannels which have different hydrophilic property on the bottom surface. The heterogeneous rectangular microchannel has three native PDMS (poly-dimethyl siloxane) surfaces which were patterned by the soft lithography. PDMS bottom surface was treated by the argon plasma and coated by the allyl alcohol (99%). The channel length was 10, 20 and 30 mm and the channel width was 100, 200 and 300 μm , respectively. Several external voltages were

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ywrhee@cnu.ac.kr

applied to make the fluid flow by the electroosmosis in the microchannel. For the same electric field strength and hydrophilicity of the bottom surface, the flow rate is almost same. This result is matched to the theoretical expectation and confirms that the experimental system is reliable. With increasing the channel width, the flow rate increased for the same hydrophilicity of the bottom surface. The flow rate of the microchannel of higher hydrophilicity was larger than that of the microchannel of lower hydrophilicity. This result implies that the hydrophilicity change of the bottom surface could be applied to control the flow rate in the microchannel.

Key words : PDMS, Electroosmosis, Heterogeneous rectangular microchannel, Hydrophilicity, Vacuum plasma

1. 서 론

최근 들어 *microsystem*에 대한 관심이 높아지면서 제약, 의료, 화학공학, 생물공학 등과 같은 산업분야에서의 연구가 활발히 진행되고 있다. *Microfluidic*을 사용하는 *microsystem*은 비용의 절감, 반응성의 증가, 에너지소비의 감소, 시스템의 소형화 등을 가능하게 하는 장점으로 인하여, 소형 연료전지와 마이크로반응기 등의 연구를 통한 청정분야와의 관련성이 매우 높다[1]. 기존에는 유리, 석영 또는 실리콘 등의 재료를 사용한 마이크로시스템의 제작이 주로 이루어졌으나, 이러한 재료들은 고가이면서 제작에 많은 시간이 필요하다는 단점으로 인하여 값싸고, 제작이 용이한 *polydimethylsiloxane (PDMS)*을 이용하여 연구가 진행되고 있다[2,3]. 그러나 PDMS의 표면은 높은 소수성을 띠기 때문에 유체의 흐름을 어렵게 하므로 플라즈마를 이용하여 PDMS의 표면을 친수성으로 바꾸어 주어야 한다[4,5]. 일반적으로 PDMS 표면을 친수성으로 바꾸어주기 위해 산소 플라즈마로 처리해 주는데, 이때 바뀐 친수성은 계속 유지되는 것이 아니라 공기 중에서 시간의 흐름에 따라 다시 소수성으로 바뀌게 된다. 이를 억제하기 위해서 소수성으로 된 PDMS 표면을 친수성으로 바꾸어 유지하기 위해 특정 용액에 세척하거나 다른 물질로 코팅하기도 한다[6,7]. 마이크로채널 내 유체의 흐름은 전기삼투에 의해 이루어지는데, 이는 고체와 액체 표면 사이에서의 전기이중층에 의해 형성된다. 특히 전기이중층의 제타포텐셜과 전기장은 마이크로채널 시스템에서 유속을 통제할 수 있는 핵심적인 요소이다 [8-10]. 마이크로채널에서 전기삼투에 의해 발생하는 유체의 흐름은 형광물질을 유체에 투입한 후 *particle image velocity (PIV)*로 관찰할 수 있다. 일반적으로 전기삼투 시스템은 채널과 저장소가 연결된 곳에 두 전극이 존재한다. 외부전압이 전기삼투 시스템에 공급되면 PDMS의 표면이 음으로 하전되어 양이온들이 달라붙고, 유체가 음극으로 이동하는 전기삼투 흐름 (*Electroosmotic Flow, EOF*)이 형성된다[11-14]. 전기삼투 시스템을 정확하게 디자인하기 위해서는 직사각형 마이크로채널의 단면적 변화의 영향을 이해해야 하고, 유속을 정확히 통제하기 위해서는 채널의 표면성질 변화를 이해해야 한다.

본 연구에서는 소수성인 세 면과 *allyl alcohol (99%)*로 코팅한 밀면으로 이루어진 비균일계 마이크로채널의 유속 변화를 조사하였다. 밀면의 접촉각은 20°와 80°로 하였다. 채널의 구조 변화의 영향을 조사하기 위해 채널의 길이는 10, 20, 30 mm로, 너비는 100, 200, 300 μm로 하였고, 전기장과 전기삼투

에 의한 유속의 관계를 알아보기 위해 다양한 외부전압을 걸어주며 유속을 측정하였다.

2. 실험

마이크로채널의 제작에서 가장 먼저 수행되어야 하는 것은 마스크를 제작하는 것이다. 원하는 패턴의 마스크를 얻기 위해 25,000 DPI의 고해상도 프린터를 사용하였다. 전기영동 시스템에서 길이 변화의 영향을 조사하기 위해 마이크로채널의 형태를 다양하게 제작하였다. SU-8 100 (Microchem, USA) 감광제 (*photoresist, PR*)를 사용하여 채널의 깊이는 100 μm로 고정하였다. Figure 1에 *soft lithography*를 사용하여 마이크로채널을 제작하는 과정을 간단하게 나타내었다.

마스크 제작이 완성되면, 실리콘 웨이퍼 (*ULTRAPACK Wafershield™, H9100-0302*)에 PR을 코팅해야 하는데 PR을 균일하게 코팅하기 위해 웨이퍼에 *hydromethylidisiloxane (HMDS)*를 10분간 노출시킨다. PR의 두께를 제어하기 위하여 *spin coater*의 회전속도를 2단계로 조절하였다. 또한 웨이퍼에 일정한 두께의 PR을 코팅한 후 PR에 존재하는 용매를 제거하기 위해 건조기를 사용하여 65°C에서 20분 동안 가열하였고, 온도를 분당 1°C 정도로 서서히 올린 후에 95°C에서 50분 동안 가열하였다. 용매가 제거된 웨이퍼 위에 디자인된

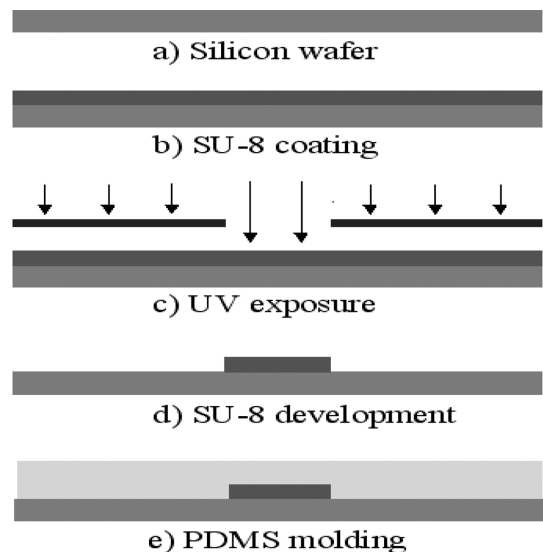


Figure 1. Process of the soft lithographic method.

마스크를 올리고 180초 동안 UV (350 nm)에 노출시켰다. UV 노출 후에는 65°C에서 1분 동안, 95°C에서 12분 동안 가열하였다. 마지막으로 현상, 세척, 건조시켜서 원하는 형태의 패턴을 웨이퍼 위에 얻을 수 있었다.

원하는 패턴이 완성되면 PDMS를 사용하여 본을 뜨게 되는데, 그 전에 웨이퍼에서 PDMS가 잘 떨어지게 할 수 있도록 웨이퍼를 trimethylchlorosilane (TMCS)에 10분간 노출시킨다. PDMS를 웨이퍼에 부은 후 진공건조기를 사용하여 0 ~ 100 mmHg의 압력에서 1시간 정도 유지하면 PDMS 내에 존재하는 기포가 완전히 제거된다. 그 후에 70°C에서 2시간 정도 가열하여 고형화시키고 웨이퍼에서 떼어내면 PDMS 패턴이 형성된다. 마이크로채널 밀면의 PDMS는 마스크 없이 soft lithography를 사용하여 제작하였고, 비균일계 마이크로채널을 만들기 위해서 밀면의 PDMS를 진공플라즈마를 이용하여 표면처리를 하였다. 진공플라즈마 장치의 개략도는 Figure 2에서 나타내었다. 먼저 PDMS 표면을 깨끗이 하기 위해 아르곤에 노출시킨 후, allyl alcohol로 코팅하였다. 코팅한 후, Face Contact Angle (Kyowa Interface, CA-A)을 사용하여 PDMS 표면의 접촉각을 측정하였는데 접촉각은 20°와 80°를 나타내었다. 원하는 패턴의 PDMS와 표면처리한 밀면의 PDMS를 접합시키고 마이크로채널의 양쪽 끝부분에 adapter를 꽂아 마이크로채널을 완성하였다.

전기삼투 흐름에서 pH 변화에 따른 영향을 없애기 위해서 pH가 7.0이고, 25.9°C에서 전도도가 4.87 mS/cm인 완충용액 (Weilheim, WTW pH 7.0, Technical buffer 50 ml)을 사용하였다. 일반적으로 마이크로채널 내에서 유체의 속도를 측정하기 위해 형광물질이나 형광입자를 사용하지만 본 연구에서는 마이크로채널 양쪽 끝에 연결된 저장소의 무게 차이를 이용하여 유속을 측정하였다. Figure 3은 본 실험에서 사용한 장치의 개략도이다. 완충용액을 채널에 유입시키고, 외부전압을 공급하기 전에 채널 내의 기포를 완전히 제거해준 후에 유량 변화를 측정한다. 만약 채널 내에 기포가 존재할 경우에는

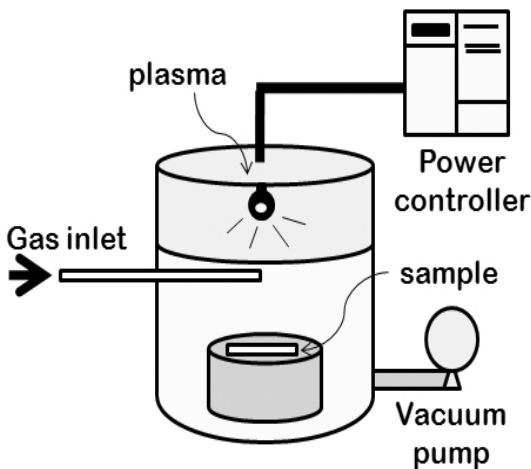


Figure 2. Schematic diagram of the vacuum plasma treatment instrument.

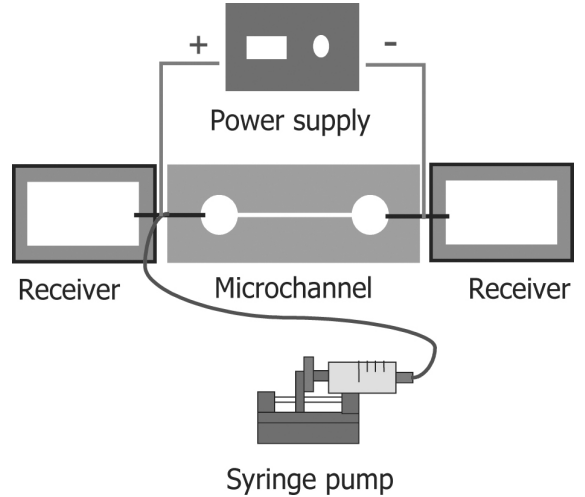


Figure 3. Schematic diagram of the flow rate measuring system.

전기삼투가 걸리지 않거나 순간적인 과전압의 원인이 되기 때문이다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서는 PDMS의 본 성질을 지닌 세 개의 면과 표면 처리한 밀면으로 이루어진 비균일계 마이크로채널의 길이와 너비를 다양하게 변화시켜가면서 유속을 측정하고자 하였다. PDMS 밀면은 진공플라즈마를 사용하여 아르곤에 노출시키고, allyl alcohol로 코팅하였다. 마이크로채널 내의 유체는 전기영동에 의해 흐름이 생성되고 따라서 전기장을 형성하여 유속을 변화시켜주기 위해 다양한 외부전압을 걸어주었다.

Figure 4 ~ 6은 밀면의 접촉각이 20°일 때, 채널 너비에 따른 유속의 변화를 보여준다. Figure 4는 채널 길이가 10 mm 일 때 외부전압에 따른 유속변화를 나타내었다. 그래프에서

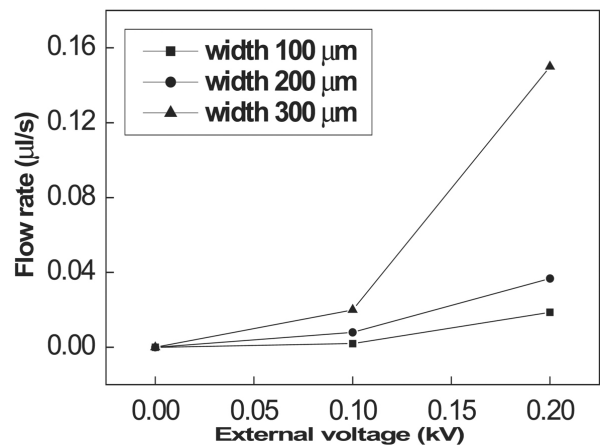


Figure 4. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 20°, channel length = 10 mm).

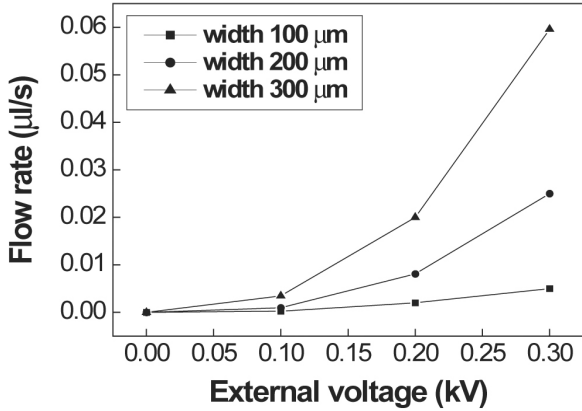


Figure 5. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 20°, channel length = 20 mm).

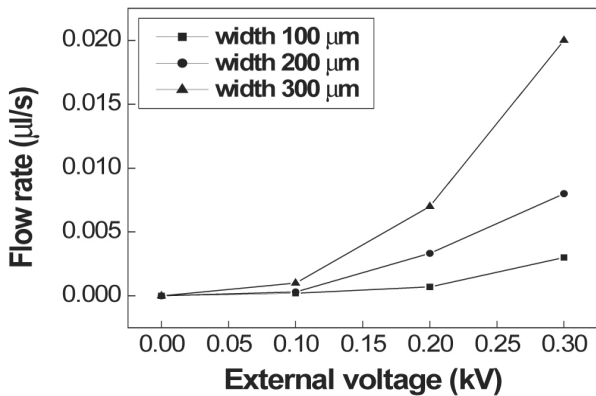


Figure 6. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 20°, channel length = 30 mm).

보면 알 수 있듯이 같은 너비를 가진 각각의 채널에 대해 유속은 외부전압의 증가에 비례하여 증가하는데, 이는 채널의 전기장이 외부전압의 증가에 따라 증가하기 때문이다. 이것은 다른 조건들이 일정하다면, 마이크로시스템에서 유체의 속도는 외부전압에 의해서 쉽게 제어될 수 있다는 것을 의미한다. 외부전압이 동일할 때에는 채널 너비가 증가함에 따라 유속이 증가하였다. 이는 0.10 ~ 0.20 kV의 높은 외부전압에서 실험해본 결과로써, 동일한 전기장에서 채널 너비가 증가함에 따라 유속이 감소하는 일반적인 유체들과는 다른 결과를 보여준다. 채널너비 증가에 대한 효과는 표면의 제타포텐셜에 기인한 전기이중층의 압축으로 설명할 수 있다[1]. Figure 5 ~ 6은 채널길이가 각각 20 mm, 30 mm인 채널의 유속 변화를 나타내고 있다. 그래프를 통하여 동일한 채널 너비를 가진 시스템은 외부전압이 증가함에 따라 유속이 증가하는 것을 알 수 있다. 외부전압이 동일할 때 유속은 채널너비가 증가할수록 증가하였는데 이는 Figure 4와 같은 경향을 나타내고 있다. 전기장은 외부전압이 증가함에 따라 증가하기 때문에 유속은 외

부전압에 비례하여 증가하고, 제타포텐셜은 채널 너비가 증가함에 따라 증가하기 때문에 유속은 채널의 너비에 비례하여 증가한다.

Figure 7 ~ 9는 채널의 밑면의 접촉각이 80°이고, 채널길이가 각각 10 mm, 20 mm, 30 mm일 때 실험 결과를 보여준다. 그래프에서 모든 마이크로채널의 너비가 같을 때 유체의 속도는 외부전압에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 채널의 길이가 같은 마이크로채널에서 같은 외부전압을 걸어주었을 때 유체의 속도는 채널의 너비가 증가함에 따라 증가하였다. 이는 Figure 4 ~ 6에서의 보여주는 결과와 동일한 이유에서 나타나는 것으로 설명할 수 있다.

동일한 전기장에서 채널의 길이에 따른 유속 변화는 Figure 10에서 보여주고 있다. 동일한 전기장을 가진 마이크로채널에서 채널의 길이가 달라져도 유체의 속도는 거의 비슷하게 나타났다. 이론적으로 채널의 길이가 변한다고 해도 채널의 유속은 전기장에 따라 변한다는 것을 알고 있기 때문에 이 결과는 본 연구에서 사용한 측정방법이 신뢰성이 있다는 것을 보여준다. 같은 유속으로 채널 길이를 변화시켜줄 때는

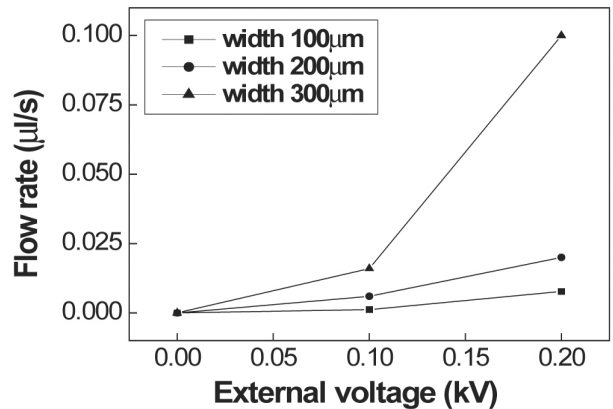


Figure 7. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 80°, channel length = 10 mm).

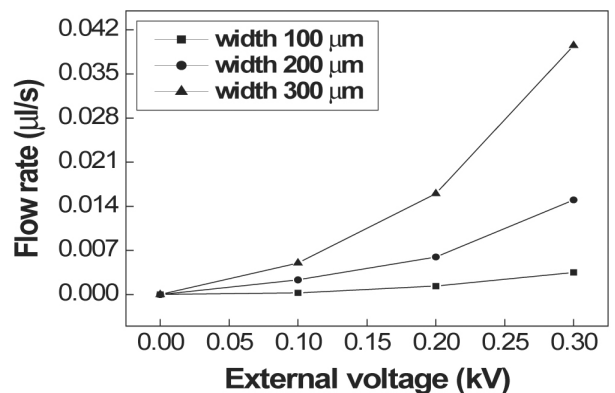


Figure 8. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 80°, channel length = 20 mm).

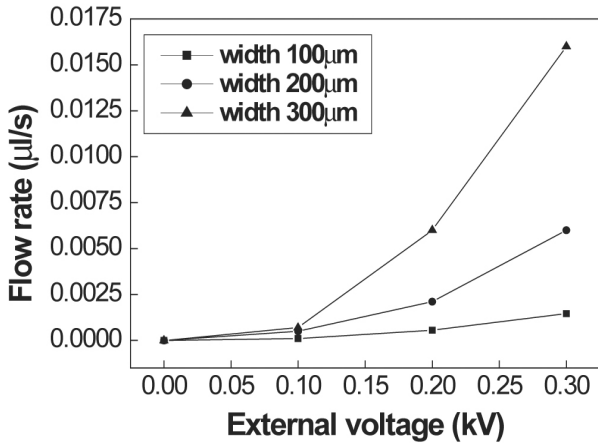


Figure 9. Flow rate change of the microchannel with various channel widths (contact angle = 80°, channel length = 30 mm).

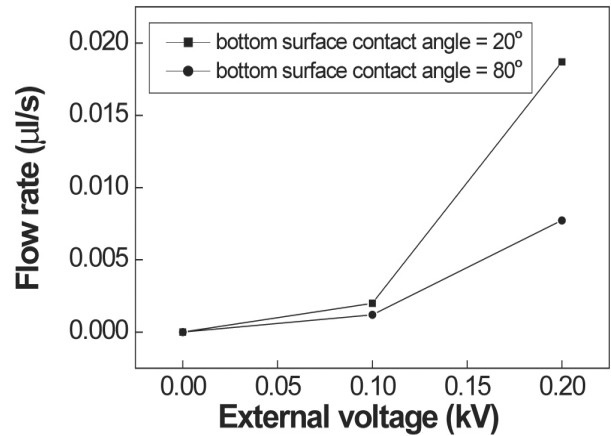


Figure 11. Flow rate change for the different bottom surface hydrophilicity (channel width = 100 μm, channel length = 10 mm).

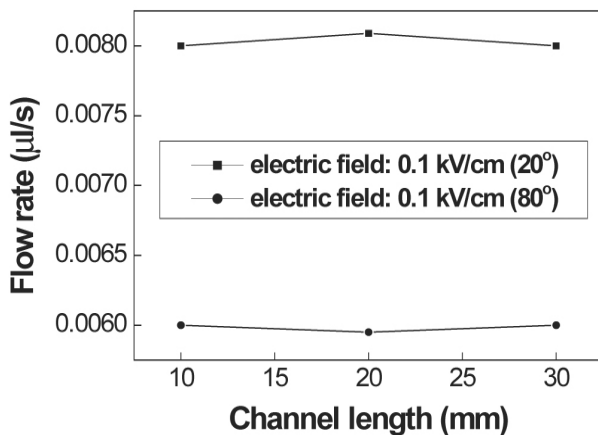


Figure 10. Flow rate change of the microchannel with the same electric field (channel width = 200 μm).

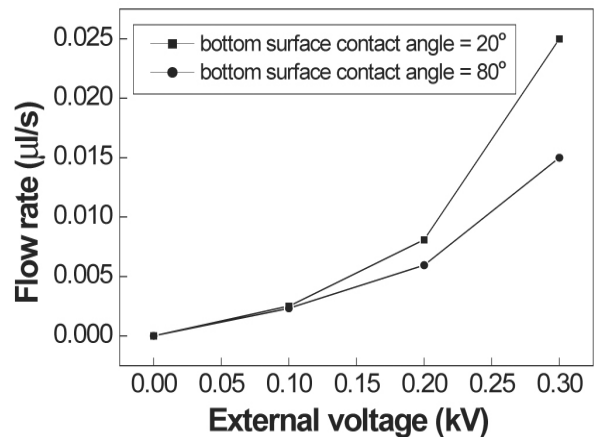


Figure 12. Flow rate change for the different bottom surface hydrophilicity (channel width = 200 μm, channel length = 20 mm).

채널길이의 변화율만큼 외부전압을 증가시켜주면 된다는 것을 보여준다.

Figure 11 ~ 13은 밀면이 접촉각이 각각 20°와 80°인 마이크로채널의 유속을 나타내고 있다. Figure 11에 채널의 길이가 10 mm, 너비가 100 μm일 때 유속의 변화를 나타내었다. 높은 친수성을 나타내는 접촉각이 20°인 밀면의 유속이 더 높게 나타났다. 낮은 전압에서 유체의 속도 변화가 뚜렷하게 변하지 않지만, 외부전압이 증가 할수록 유속의 변화도 증가하였다. 이는 전기삼투 흐름에서 표면성질의 차이가 유속 변화에 영향을 줄 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 같은 조건일 때에는 표면성질을 바꿔줌으로써 유속을 제어할 수 있다는 가능성을 보여준다. Figure 12는 채널의 길이가 20 mm, 너비가 200 μm일 때 유속의 변화를 보여주는데 채널 밀면이 높은 친수성을 나타낼수록 유속이 높게 나타났다. Figure 13은 채널의 길이가 30 mm, 너비가 300 μm일 때 유속의 변화를 보여주고 있

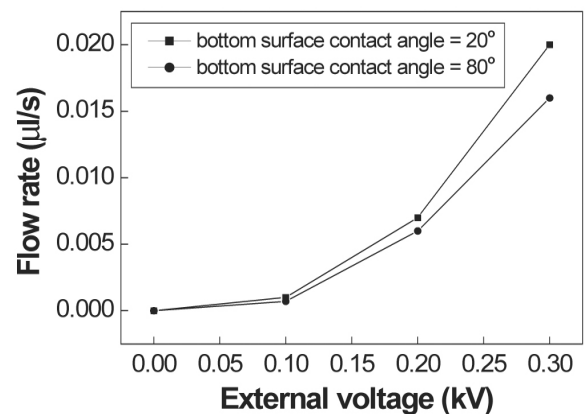


Figure 13. Flow rate change for the different bottom surface hydrophilicity (channel width = 300 μm, channel length = 30 mm).

다. Figure 13에서 유속의 변화는 Figure 11 ~ 12와 같은 경향을 나타냈다. Figure 11 ~ 13의 결과에 따르면 채널의 길이와 너비 변화에 상관없이 표면성질의 변화가 항상 유속의 변화에 영향을 준다는 결론을 얻을 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비균일계 마이크로채널에서 유체의 흐름을 채널의 너비와 길이, 외부전압에 따른 영향을 조사하였다. 비균일계 마이크로채널을 만들기 위해 채널의 밑면을 allyl alcohol로 코팅하여 PDMS 표면을 친수성으로 바꾸어 주었고, 밑면의 접촉각은 20°와 80°로 하였다. 그 결과 외부전압이 증가함에 따라 마이크로채널의 유속 또한 증가하였다. 외부전압, 채널 밑면의 접촉각과 채널 길이가 동일할 때 채널 너비가 증가할수록 유속도 증가하는 것을 보여주었다. 또한 채널의 밑면의 접촉각이 작을 때 유속이 항상 높게 나타났다. 따라서 마이크로채널의 표면성질이 유속을 제어할 수 있는데 기여한다는 것을 알 수 있었다.

감 사

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

참고문헌

1. Lee, H. S., Kim, K. H., Yu, J. K., Noh, S. Y., Choi, J. H., Yoon, S. K., and Rhee, Y. W., "Potential Change in the Cross Section of the Rectangular Microchannel with Different Hydraulic Diameter", *Clean Tech.*, **12**(4), 211-216 (2006).
2. Hillborg, H., Ankner, J. F., Gedde, U. W., Smith, G. D., Yasuda, H. K., and Wikström, K., "Crosslinked Polydimethylsiloxane Exposed to Oxygen Plasma Studied by Neutron Reflectometry and Other Surface Specific Techniques", *Polymer*, **41**, 6851-6863 (2000).
3. Ren, X., Bachman, M., Sims, C., Li, G. P., and Allbritton, N., "Electroosmotic Properties of Microfluidic Channels Composed of Poly(dimethylsiloxane)", *J. Chromatography B*, **762**, 117-125 (2001).

4. Berdichevsky, Y., Khandurina, J., Guttman, A., and Lo, Y. H., "UV/ozone Modification of Poly(dimethylsiloxane) Microfluidic Channels", *Sensor. Actuat. B*, **97**, 402-408 (2004).
5. Hu, S., Ren, X., Bachman, M., Sims, C. E., Li, G. P., and Allbritton, N., "Surface Modification of Poly(dimethylsiloxane) Microfluidic Devices by Ultraviolet Polymer Grafting", *Anal. Chem.*, **74**, 4117-4123 (2002).
6. McCormick, R. M., "Capillary Zone Electrophoretic Separation of Peptides and Proteins Using Low pH Buffers in Modified Silica Capillary", *Anal. Chem.*, **60**, 2322-2328 (1988).
7. 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).
8. Erickson, D., and Li, D., "Analysis of Alternating Current Electroosmotic Flows in a Rectangular Microchannel", *Langmuir*, **19**, 5421-5430 (2003).
9. Chan, C. C. V., Elliott, J. A. W., and Williams, M. C., "Investigation of The Dependence of Inferred Interfacial Tension on Rotation Rate in a Spinning Drop Tensiometer", *J. Colloid Inter. Sci.*, **260**, 211-218 (2003).
10. Yang, C., and Li, D., "Analysis of Electrokinetic Effects on the Liquid Flow in Rectangular Microchannels", *Colloids Surf. A*, **143**, 339-353 (1998).
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., and Li, D., "Direct and Indirect Electroosmotic Flow Velocity Measurements in Microchannels", *J. Colloid Inter. Sci.*, **254**, 184-189 (2002).
13. Meinhart, C. D., Wereley, S. T., and Santiago, J. G., "PIV Measurements of a Microchannel Flow", *Exp. Fluids*, **27**, 414-419 (1999).
14. Lee, H. S., Kim, K. H., Yu, J. K., Noh, S. Y., Choi, J. H., Yoon, S. K., Lee, C.-S., Hwang, T.-S., and Rhee, Y. W., "Potential Changes of the Cross Section for Rectangular Microchannel with Different Aspect Ratios", *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(1), 186-190 (2007).