

표면 습윤성에 따른 마이크로 채널 내 유동 연구

금현준* · 김지훈*** · 변도영*** · 이석한** · 고한서†

Study on Flow by Surface Wettability in Micro-channel

Hyun-Joon Keum, Jee-Hoon Kim, Doyoung Byun, Sukhan Lee, Han Seo Ko

Abstract

현재 많은 연구들이 작은 크기에 여러 공정을 집적시킬 수 있는 장점을 가진 마이크로 장치의 개발과 활용에 집중되고 있다. 마이크로 장치에서 가장 중요한 것은 미세 유동의 효율적인 제어이다. 본 연구에서는 마이크로 장치에 직접 적용 가능한 표면 개질된 마이크로 채널의 유동에 대하여 고려하였다. 표면 개질(surface treatment)은 물리적, 화학적인 작용을 통해서 채널 내부 표면의 습윤성을 변화시켜 유동을 제어하는 방법이다. 친수성(glass)을 가지는 마이크로 채널 내부의 일부를 소수성(teflon)으로 개질 후, 고속카메라를 이용하여 채널 내부를 흐르는 유체의 유동 경계면 변화를 분석하였다. 또한 유동 해석을 위한 상용 코드(CFD-ACE)를 이용하여 유동에 대한 수치 해석을 진행하여 가시화된 실험 결과와 비교 분석하였다. 실험 결과와 수치 해석 결과를 통해, 친수성과 소수성 표면 배열에 따른 일시적인 유동 변화를 관찰하였다. 본 연구 결과를 통해 마이크로 채널 유동의 최적화 상태를 찾을 수 있으며, 보다 용이한 미세 유동 제어가 가능하다.

Key Words : Wettability(습윤성), Surface treatment(표면 개질), Contact angle(접촉각), CFD(전산 유체 역학),

1. 서론

MEMS(Micro Electro Mechanical System) 장치개발이 급속도로 이루어짐에 따라 크기에 따른 이점과 많은 장치들을 집적할 수 있는 이른바 "Lab-on-a-chip" 이 적극적으로 활용되어, 그 중

요도가 증가하고 있다. MEMS 기술은 마이크로 열교환기, 마이크로 펌프, 마이크로 믹서와 같은 다양한 제품의 개발과 연구가 가능하게 하였으며, 이와 관련하여 마이크로 장치들의 제어가 중대한 문제가 되었다 [1].

마이크로 장치에서 가장 중요한 것은 미세유동의 효율적인 제어인데, 연속적으로 쓰일 수 있는 제어 방법은 노즐 내부의 표면을 개질하여 노즐 표면의 에너지를 변화시키는 방법이다. 표면 개질(surface treatment)은 표면 자체의 성질을 물리적, 화학적으로 변화시키는 방법이다 [2][3][4]. 이 때, 개질 후 표면에너지가 높은 상태가 되어 표면이 유체를 끌어당기는 성질이 유체 응집력보다 강한 성질을 친수성(hydrophilic), 표

† 성균관대학교 기계공학부
E-mail : hanseoko@skku.edu

* 성균관대학교 기계공학부 대학원

** 성균관대학교 정보통신공학부

*** 건국대학교 항공우주공학부

면에너지가 낮은 상태가 되어 유체자체의 응집력이 더 강하게 나타나는 성질을 소수성(hydrophobic)이라고 한다.

표면 개질은 화학적인 물질의 도포(coating)를 통하여 가능케 할 수 있다. 본 연구에서는 친수성의 표면 성질을 가지는 유리로 만들어진 마이크로 채널 내부에 대해서, 소수성 물질인 테플론(Teflon)을 이용하여 표면 개질을 시도했다 [5].

마이크로 채널 내부를 표면 개질 후 고속카메라(High-speed Camera)를 이용하여 유동 변화를 측정하였고, 이를 수치해석을 통해 얻은 결과와 비교하였다. 특히, 채널 내부 표면 에너지가 변화하는 부분의 유동 메니스커스(meniscus)의 일시적인 변화를 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 개방상태의 정적 접촉각 정의

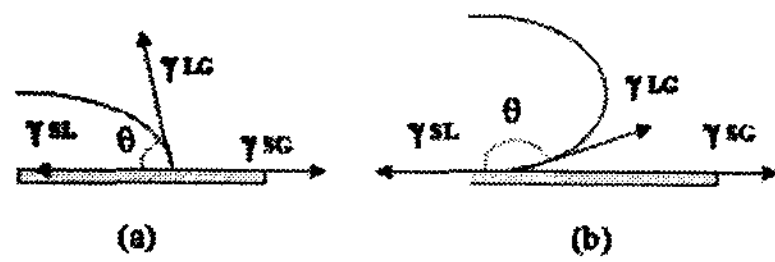


그림 1 친수성과 소수성의 정적 접촉각

그림 1에서 보이는 친수성과 소수성의 접촉각의 차이는 유체와 표면사이의 상호 인력과 유체 스스로의 응집력 간의 차이 때문이다. 친수성에서 표면에너지의 인력으로 인하여 접촉각이 90°보다 작게 나타나며, 소수성은 유체 응집력으로 인하여 90°보다 크게 나타난다.

Young's Laplace 이론에 따라서 정적인 상태에서의 접촉각은 식 (1)과 같이 제시된다.

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \cos \theta \quad (1)$$

2.2 마이크로 채널 내 동적 접촉각의 정의

그림 2의 유동에서 친수성과 소수성 경계에서 접촉각은 θ_b 로 나타내며 곡률 R_1 이 형성된다.

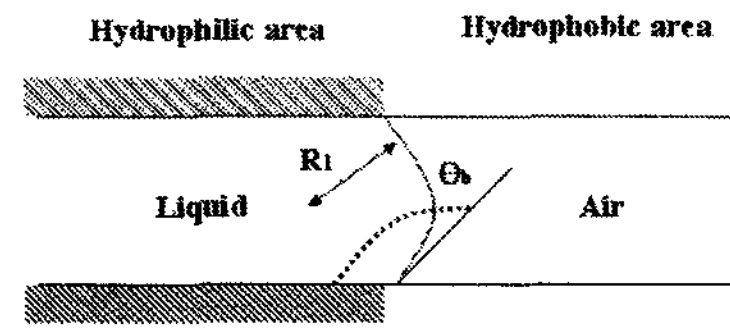


그림 2 마이크로 채널 내 동적 접촉각

표면 에너지 차이에 의한 압력은 오목한 곳에서 볼록한 구간보다 더욱 높게 되며, 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\Delta P = \gamma(1/R_1 + 1/R_2) \quad (2)$$

또한 내부 곡률반지름은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_1 = h/2\sin(\theta_b - 90^\circ) \quad (3)$$

이를 유발하는 주요한 원인은 수직의 벽면에서 일어나는 최대 압력이 다음과 같이 표현되기 때문이다.

$$P_{max} = \Delta P = (2\gamma/h)\sin(\theta_n - 90^\circ) \quad (4)$$

따라서 친수성 영역과 소수성 영역이 맞닿는 지점에서 메니스커스가 일시적으로 변하게 됨을 예측할 수 있다.

3. 연구 방법

3.1 테플론 코팅

마이크로 노즐을 대체할 마이크로 채널은 Vitrocom, Inc의 Vitrocells #8320, 200×200μm을 사용하였다. 소수성 물질인 Teflon을 코팅하기 위해, Dupont Teflon AF 1600을 액체 상태로 녹여 마이크로 채널 내부를 코팅하였다.

최종적으로 Teflon이 안정적으로 표면에 정착되어야 하고, 오염을 방지하기 위해, 250°C의 온도에서 Baking 작업을 하였다 [6]. 최종적으로 테플론이 제대로 코팅되었는지를 확인하기 위해 DI water를 노즐 내부로 유입시켜 코팅 부분의 이미지를 얻었다.

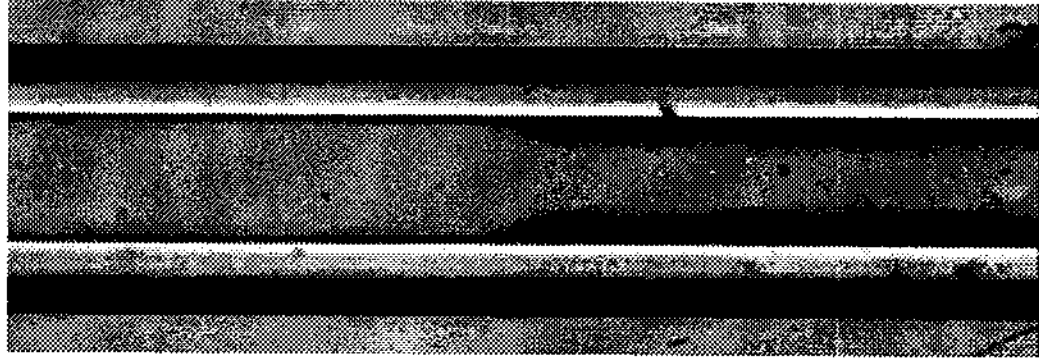


그림 3 왼쪽은 테플론 코팅지역, 오른쪽은 DI water에 의해 wetting된 부분

3.2 수치해석

CFD-ACE를 이용하여 그림 4와 같이 채널 중간에 경계면이 존재하는 크기를 갖는 마이크로 채널을 대상으로 해석하였다. 표면 성질에 따른 유동 영향을 알아보기 위해서 자유 표면을 갖는 것으로 해석하였다.

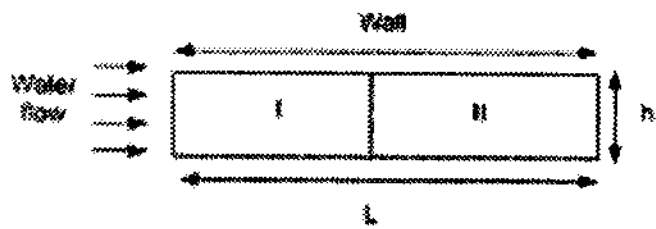


그림 4 너비1mm, 높이100 μ m의 마이크로 채널

Flow Module에서 지배 방정식은 수학적으로 보존법칙에 의해 아래의 식 (5)와 같이 질량보존 (mass consternation)방정식과 운동량보존 (momentum conservation) 방정식으로 나타내어 진다

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{M_x} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{M_y} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w V) &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{M_z} \end{aligned} \quad (5)$$

메니스커스의 자유표면은 Hirt and Nichols에 의해 쓰여진, Volume of Fluid (VOF) 방법을 이용하여 해석하였다. Free Surface(VOF) Module은 임의의 섞이지 않는 유동의 경계를 가지는 두 개의 유동에 대해 유체역학적으로 모델링하는 방법이다. VOF 방법의 중요한 특징은 격자계에서 두 번째 유동의 분포를 single scalar field variable, F로 계산이 가능하다는 것이다. Volume fraction 분포는 식 (6)에서 수동 수송 방정식

(passive transport equation)의 해를 얻음으로써 구해질 수 있다. 이때, F는 액체의 체적율을 의미한다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{v} F = 0 \quad (6)$$

해석 조건은 속도와 벽과 액체가 이루는 접촉각(contact angle) 두 가지를 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

해상도에 따라서 촬영 한계 정의가 가능한 Photron. Inc 고속카메라(Ultima APX)를 이용하였고, 매 사진은 4프레임마다 분석한 결과이다. 200 \times 200 μ m 크기의 사각 마이크로 채널을 30mm/s의 속력으로 지나가도록 유량을 조절하였다. 이 때, 유량의 일정한 공급을 위하여, 실린지 펌프(syringe pump)를 이용하였다.

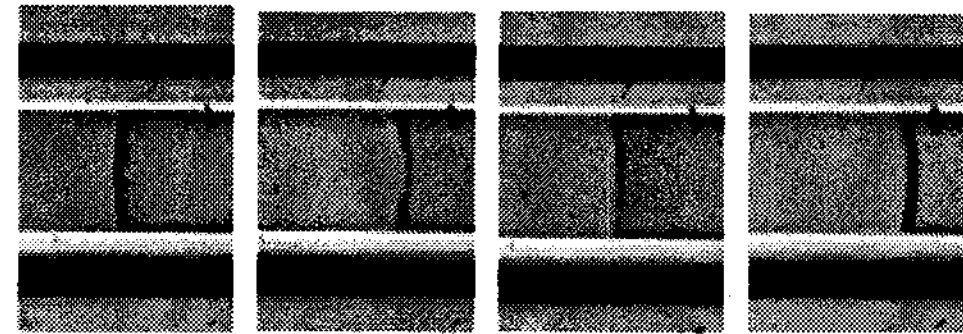


그림 5 친수성에서 소수성으로 진행하는 유동의 메니스커스

그림 5는 우측이 소수성 영역일 때의 결과를 보여주고 있다. 유동이 경계면에 도달할수록, 벽 근처의 유체는 잠시 점차 속도가 감소하였다. 그로 인해 전체적인 유동의 속도가 현저하게 느려졌고, 유동 중앙 부분 메니스커스의 형상이 점차 변화하는 현상을 보였다. 이는 친수성의 표면에너지가 높은 상태인 후부의 유체 모멘텀(momentum) 효과에 의해 상대적으로 중앙부 유체 모멘텀이 역행(backward) 흐름 양상을 보이기 때문이다. 그림 6은 이러한 영역 배치에 대한 수치해석의 결과이다. 수치해석의 결과와 실험결과는 거의 일치하고 있다.

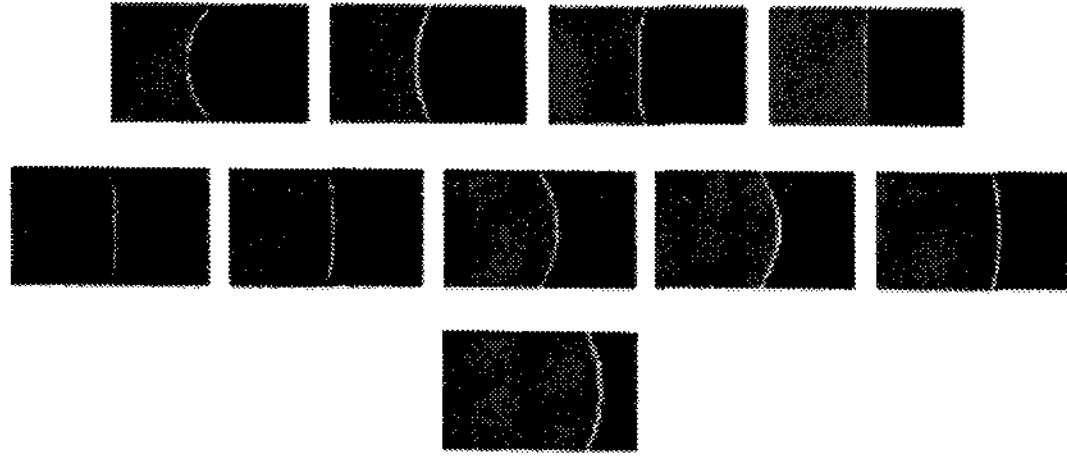


그림 6 수치해석에 의해 분석된 친수성에서 소수성 방향의 메니스커스 변화

그림 7은 좌측이 소수성 영역을 나타내는 채널의 결과를 보여주고 있다. 경계면에 도달했을 때, 채널 중앙과 벽면은 비슷한 속도로 이동하였으며, 벽면의 속도가 더 증가되는 양상을 보였다. 이러한 현상은 친수성의 표면에너지가 소수성의 에너지보다 현저히 크기 때문에, 소수성 벽면에서의 모멘텀을 가속시키는 효과인 것으로 사료된다.

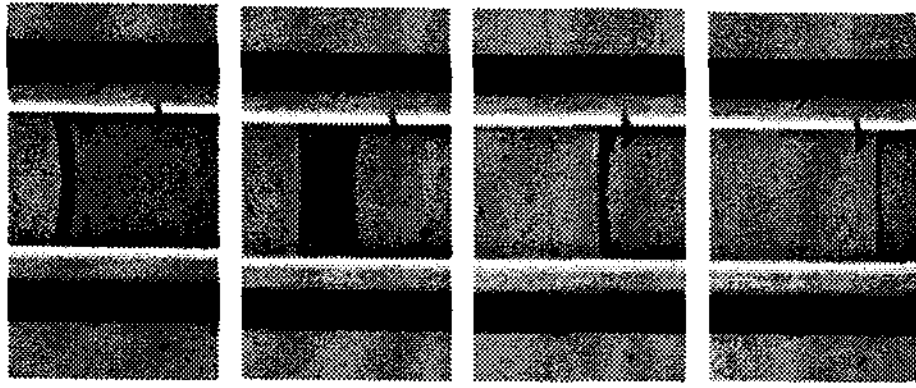


그림 7 소수성에서 친수성으로 진행하는 유동의 메니스커스

그림 8은 수치해석으로 분석한 결과이며, 실험결과와 수치해석 결과가 잘 일치하는 것을 보여주고 있다.

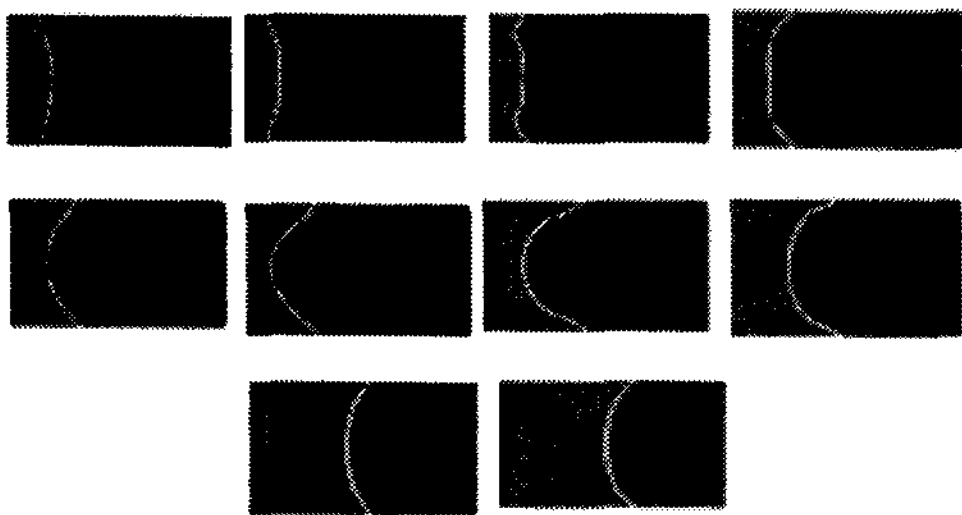


그림 8 수치해석에 의해 분석된 소수성에서 친수성방향의 메니스커스 변화

또한 친수성 벽면과 소수성 벽면의 경계면에서의 속도 정보를 얻기 위해서 수치해석의 결과를 분석하여 그래프를 얻은 결과가 그림 9에 나타나 있다.

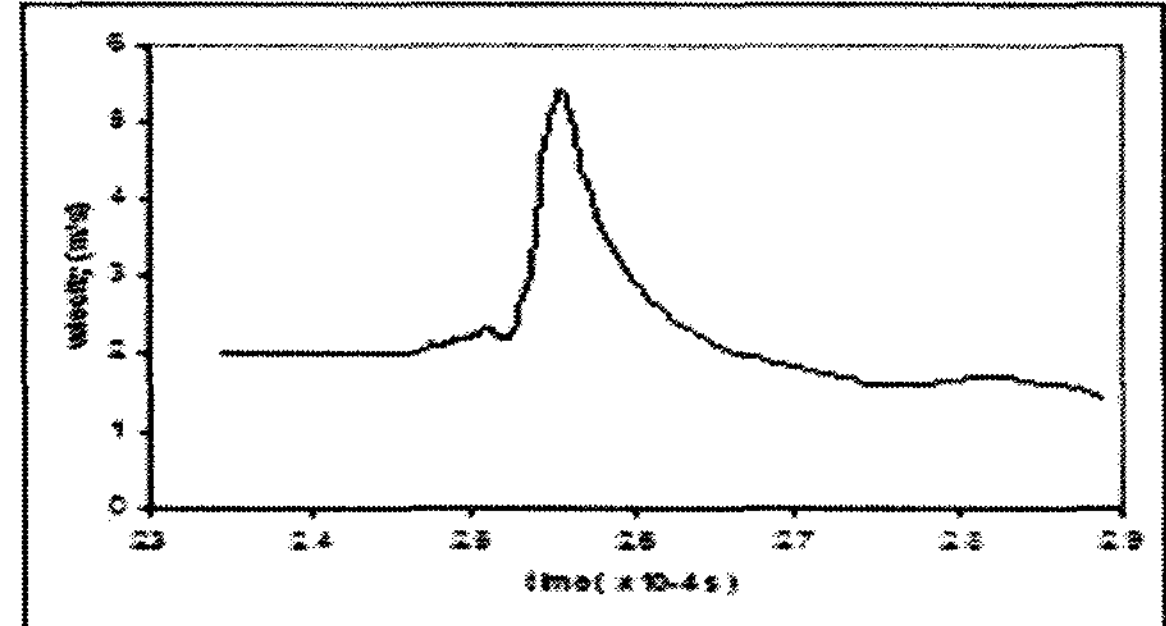


그림 9 표면 변화에 의한 메니스커스의 일시적 유동 변화 속도

같은 속도 조건에서 초기와 안정된 상태에서의 표면과 유체간의 동적 접촉각(dynamic contact angle) 차이가 클수록 유동 안정화를 위해 필요한 거리는 길어지는 결과를 보이고 있다. 이는 벽면의 표면 에너지 변화로 인한 모멘텀의 변화가 곧 노즐 내 유동 안정화와 직결되어지기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로 장치에 적용 가능한 마이크로 채널의 유동효과에 대해 고려하였다. 대표적 표면에너지 성질인 친수성과 소수성을 서로 다른 순서로 배열함으로써 유동의 일시적인 변화가 일어나게 되며, 이에 표면 에너지에 따른 유동 메니스커스가 변화하는 상태에 대하여 실험을 수행하고 수치해석과 비교 분석을 하였다. 이러한 표면 에너지의 변화를 이용하여 마이크로 채널 내의 유동을 최적화시킬 수 있는 상태를 찾을 수 있으며, 이 상태를 제어함으로써 마이크로 장치의 작동을 제어할 수 있다.

후 기

This research was supported by Korea Research Foundation Grant (KRF-2005-D00045 (I01474)) and in part, by the Second-Phase of the Brain Korea 21 Project in 2006.

참 고 문 헌

- 1) Freemantle, M. et al, 1999, Chem. Eng. News, 77(8)
- 2) Junghoon Lee. et al, 2002, "Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling", Sensors and Actuators, A 95, pp259-268.
- 3) Masahide Gunji. et al, 2005, "Local In-Situ hydrophilic treatment of micro channel using surface discharge", The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, Seoul, Korea, June 5-9, 2005, pp. 1187-1190.
- 4) Bin Zhao. et al, "Surface-Directed liquid flow inside microchannels", Science, vol. 291, 9 February, 2001, pp. 1023-1026.
- 5) Doyoung Byun. et al, "Dynamic PIV Measurements of Meniscus Movement Across Interface Between Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces in a Microchannel", 6th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Pasadena, California, USA, September 21-23, 2005
- 6) Rosalynn Manor. et al, "Microfabrication and Characterization of Liquid Core Waveguide Glass Channels Coated With Teflon AF", IEEE Sensors Journal, Vol. 3, No. 6, December, 2003