

Micro-PIV 기법을 이용한 미세유로 내 두 유체 유동 측정

성형진[†] · 김병재* · 류임정**

Micro PIV measurements of two-fluid flows in a microchannel

Hyung Jin Sung, Byoung Jae Kim and Ying Zheng Liu

Abstract

Micro PIV was applied to measure velocity profiles of two-fluid flows in a microchannel. In this work, the two-fluid flow of two glycerol-water mixtures was measured for three cases ($\phi=0$ and $\phi=0.2$; $\phi=0.1$ and $\phi=0.5$; $\phi=0$ and $\phi=0.6$). The flow rates of two fluids were the same. The experimental velocity profiles agreed well with numerical simulations. However, a slight deviation was found in the fluid with low concentration. Rather than the effects of the varying refractive indices inside the channel, the high velocity gradient effect was thought as the main source of the deviation.

Key Words : 두 유체 유동(two-fluid flow), 미세유로(microchannel), micro PIV

1. 서론

최근 MEMS 기술의 발달로 소형유체기계(microfluidic device) 제작이 가능해졌다. 소형 유체기계들을 디자인하는데 있어 미세유로 내 유동해석은 기초적이며 필수적이다. 미세유로 내에서 흔히 일어나며 중요한 유동중 하나는 유체혼합이다. 그러나 매우 작은 레이놀즈수(Reynolds number)로 인하여 미세유로 내에서는 혼합이 잘 이루어지지 않는 것으로 알려져 있으며, 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다[1].

미세유로 내 유체혼합에 관한 논문조사에 의하면 주로 한 유체유동 해석만을 수행해왔다. 혼합 정도를 평가하기 위하여 어떤 물성치의 확산 정도를 수치해석하는 방법[2], 서로 만나면 색이 변하는 유체를 사용하는 방법[3], 형광물질의 분포를 사용하는 방법[4] 모두 미세유로 내 한 유체유동을 다루고 있다. 이 방법들은 미세유로 내 유

체혼합특성을 해석하는데 있어 대략적인 경향을 보여줄 수 있지만, 대개 성질이 다른 두 유체가 혼합되므로 정확한 해석이 될 수 없다.

이에 미세유로에서 물성치가 다른 두 유체유동을 해석하고자 시도되고 있다. Liu(2004)등은 기존에 고안된 미세혼합기(micromixer)에 두 유체혼합을 적용하였다[5]. 혼합기의 두 입구에 농도가 서로 다른 글리세롤 수용액을 주입하고 유체가 흘러감에 따라 농도분포가 어떻게 변해가는지 관찰하였다. 그 결과 입구 농도 조건에 따라 혼합특징이 달라짐을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 두 유체유동의 정량적 측정기법으로 micro PIV를 적용하였다. Y 모양의 미세유로에 농도가 다른 두 글리세롤 수용액을 같은 유량으로 주입하고 두 유체가 만난 직후 속도분포를 측정하였다. 사용된 글리세롤의 농도는 $\phi=0$ 과 $\phi=0.2$, $\phi=0.1$ 과 $\phi=0.5$, $\phi=0$ 과 $\phi=0.6$ 세 경우이다. 실험결과는 수치해석과 비교하였다.

[†] 한국과학기술원 (KAIST)

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

* 한국과학기술원 (KAIST)

** Shanghai Jiaotong University

2. 실험장치

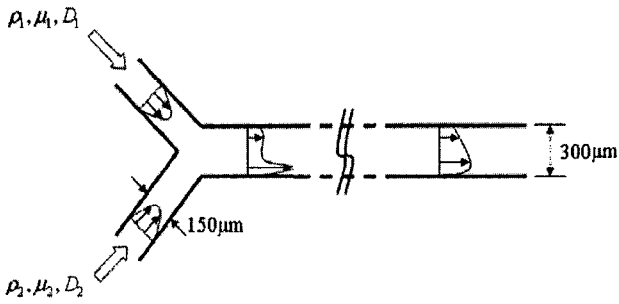


그림 1 Y 모양 미세채널(깊이=50 μm)

표 1. 25°C에서 글리세롤 수용액 물성치 ([6],[7])

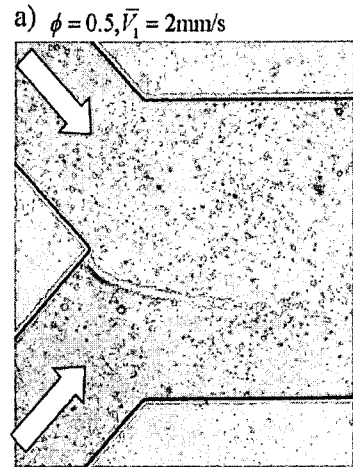
질량농도	밀도 g/cm	점성계수	확산계수	굴절률
0	1.000	0.888	10.6	1.333
0.1	1.021	1.147	8.98	1.345
0.2	1.044	1.527	7.52	1.357
0.3	1.067	2.137	5.81	1.370
0.4	1.091	3.130	4.18	1.384
0.5	1.117	4.991	3.24	1.398
0.6	1.143	8.640	2.30	1.413
1.0	1.264	887	-	1.476

그림 1 은 본 실험에서 사용된 Y 모양의 미세 유로이며, 사각홈이 파여있는 PDMS 위에 두께 1mm 유리판을 부착하여 만들었다. 유로의 너비는 300 μm, 깊이는 50 μm이며, 두 개의 입구로부터 농도가 서로 다른 글리세롤 수용액이 들어가게 된다. 표 1 은 25°C에서 글리세롤 수용액의 질량 농도에 따른 물성치를 보여준다. 농도가 증가함에 따라 농도, 점성계수, 굴절률은 증가하고 확산계수는 감소함을 볼 수 있다.

Micro-PIV 측정에 사용된 형광입자의 크기 $d_p = 0.7 \mu\text{m}$ 이며, 612nm 파장을 가지는 Nd:Yag 레이저, 12 비트 카메라, NA=40 (numerical aperture) 대물렌즈를 사용하였다. 두 유체의 경계부분에서는 속도가 급격하게 변하므로 개선된 속도추출 알고리즘을 사용하였다[8][9].

3. 실험결과 및 고찰

그림 2 는 두 글리세롤 수용액의 농도가 각각 $\phi = 0.1$, $\phi = 0.5$ 이고 평균속력이 2mm/s 일 때 실험장면, 실험결과, 수치해석 결과를 보여준다. 여기서 수치해석은 표 1 에 참조하여 유체의 물성치 변화를 고려한 결과이다[5]. 두 유체가 만난 직후 주유동방향 속도분포를 보면 높은 점성계수 유체가 넓은 영역을 차지하고 있으며 그로 인하여 낮은 점성계수 유체의 속력이 빠름을 볼 수 있다.



$\phi = 0.1, \bar{V}_2 = 2\text{mm/s}$

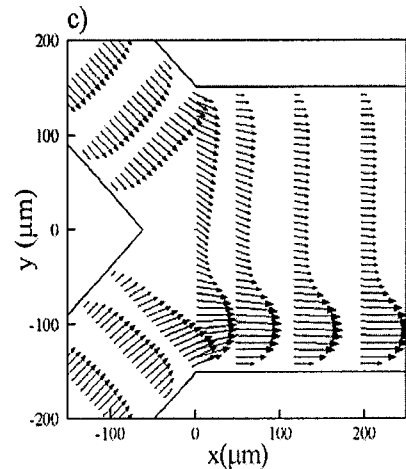
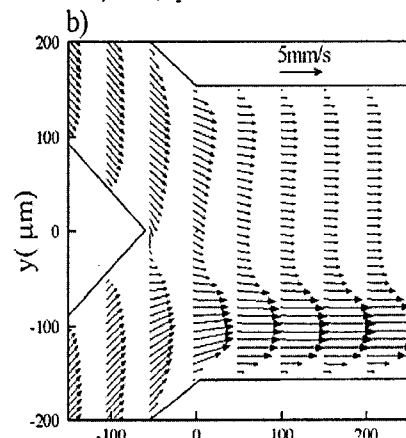


그림 2. $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$ (a) 두 유체유동 사진, (b) 속도분포(실험), (c) 속도분포(수치해석)

그림 3~5 는 세 경우($\phi = 0$ 과 $\phi = 0.2$, $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$, $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$)에 대하여 두 유체가 만난 후 300 μm 지점에서 속도분포를 실험과 수치해석 결과를 비교한 것이다. 여기서 대시라인은 두 유체의 경계를 나타내는 것으로 수치해석하여 얻어진 농도분포에서 두 입구유체의 농도들의 평

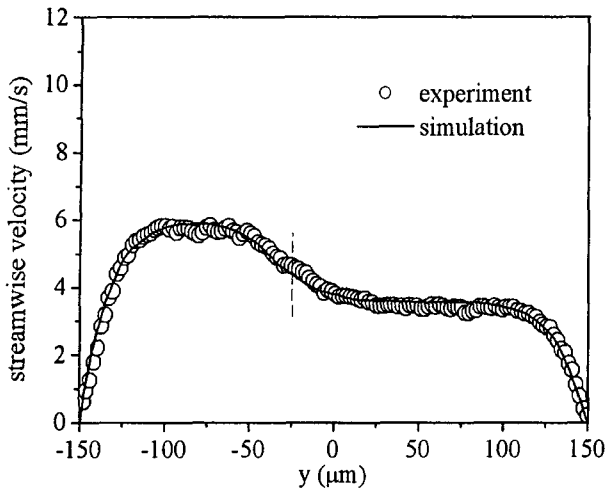


그림 4. $\phi = 0.1$ 과 $\phi = 0.5$ 일 때 $300\mu\text{m}$ 지점에서 두 유체유동 속력분포

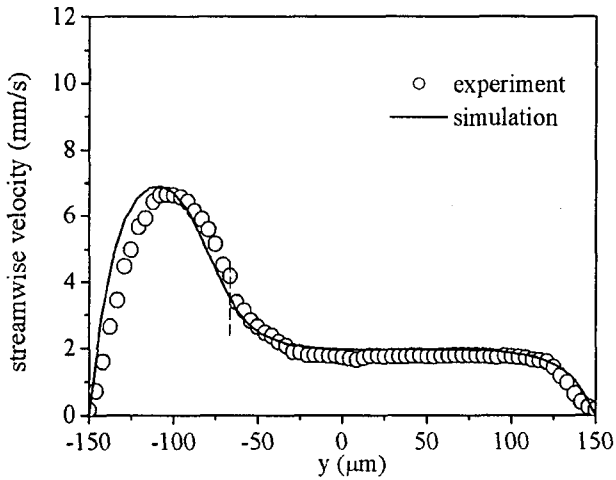


그림 3. $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.2$ 일 때 $300\mu\text{m}$ 지점에서 두 유체유동 속력분포

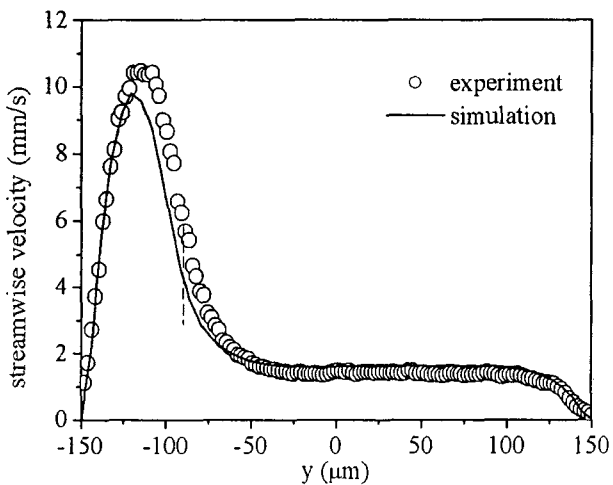


그림 5. $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$ 일 때 $300\mu\text{m}$ 지점에서 두 유체유동 속력분포

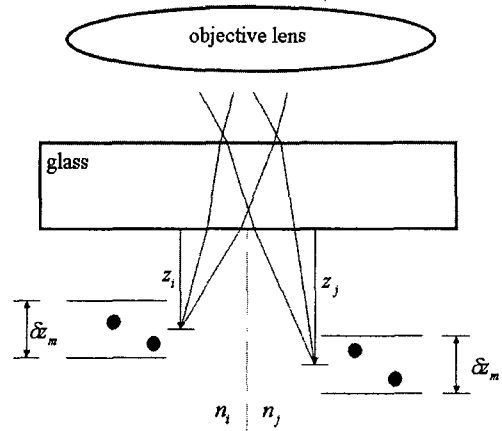


그림 6. 대물렌즈를 이용한 추적입자측정 계략도

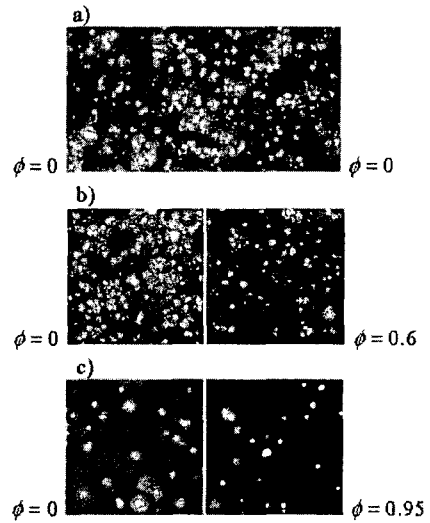


그림 7. 두 유체의 경계부근에서 촬영된 입자영상

균에 해당하는 곳이다. 보는 바와 같이 세 가지 경우 모두 수치해석결과와 전반적으로 잘 일치함을 보여준다. 그러나 두 유체의 농도차이가 커질수록 속력분포 곡선이 수치해석결과와 약간씩 차이가 커짐을 볼 수 있다.

여기서 두 유체의 굴절을 차이에 의한 오차 기여도에 대하여 생각해 보자. 그림 6은 입자를 측정하는 모습으로 형광입자로부터의 빛은 작동유체, 유리판, 공기를 거쳐서 대물렌즈로 들어가게 된다. 여기서 δ_m 은 측정시스템의 out-of-plane 분해능이고[10], z_i, z_j 는 유체 i, j 에서의 초점면에서 유리판 밑면까지의 거리이다. 굴절을 의한 오차로 유추할 수 있는 것은 첫째, 얻어진 영상의 초점면이 평면이 아닌 반면수치해석결과는 채널의 중앙부분으로 평면이기 때문이다. 작동유체의 굴절률이 일정하지 않기 때문에 얻어진 영상은 곡면에 해당한다. 만약 $\delta_m < |z_i - z_j|$ 라면 하나의 대물렌즈로부터 얻어진 평면이 아니게 된다. 그러나 본

연구에서는 굴절률이 높은 유체의 $z_j = 25 \mu\text{m}$ 가 되도록 대물렌즈 위치를 조절하였고, $\phi = 0$ 과 $\phi = 0.6$ 일 때에도 $\delta z_m = 7 \mu\text{m} > |z_i - z_j| = 0.5 \mu\text{m}$ 이므로 측정초점거리 차이에 의한 오차는 그리 크지 않다고 할 수 있다. 그러나 δz_m 는 대물렌즈의 NA에 대략 제곱 반비례하므로 오일임머즈 렌즈(oil-immersed lens)와 같은 NA가 큰 대물렌즈를 쓰면 측정초점거리 차이가 클 수 있다.

둘째, 두 유체 내 입자 영상의 질의 차이이다. 형광입자로부터 방출된 빛은 작동유체, 유리판, 공기를 거쳐 대물렌즈를 통과하게 된다. 이때 빛이 통과하는 경로에 굴절률이 다른 물질이 존재한다면 렌즈의 수차가 커지게 되어 입자영상이 또렷하지 않게 된다. 그림 7은 그 현상을 보여준다. 그림 7의 위 두 그림은 에어임머즈 렌즈(air-immersed lens)를 사용한 것이고 세번째 그림은 오일임머즈 렌즈를 사용한 것이다. 오일과 유리의 굴절률이 비슷한데다 수용액의 농도가 클수록 굴절률이 유리와 비슷하게 되어 세번째 그림 $\phi = 0.95$ 일 때 입자영상이 가장 또렷함을 볼 수 있다. 반면 농도가 낮을수록 수차의 영향이 커서 입자가 또렷하지 않음을 볼 수 있다. 그러나 그림 3의 $\phi = 0.1$ 에서는 오차가 작은 반면, 그림 5의 $\phi = 0.1$ 에서는 오차가 크다. 이것으로 두 유체 사이에 어느 정도 입자영상의 질 차이는 있을 수 있지만 그 영향은 크지 않음을 알 수 있다.

굴절률 차이에 의한 오차 외 주요 오차요인으로는 큰 속도구배에 의한 알고리즘의 한계를 들 수 있다. $\phi = 0.1$ 에서의 입자이동은 약 9 픽셀, $\phi = 1 \sim 2$ 픽셀이었고, 반복 알고리즘에서 처음 조사구간의 크기는 32 픽셀이었다. 보는 바와 같이 그림 5의 $\phi = 0.1$ 부분의 속도구배가 굉장히 크다. 수치해석상으로 $\phi = 0.1$ 부분의 최고속력이 $\phi = 0.1$ 인 곳의 최고속력보다 약 5 배 정도 차이가 난다. 따라서 주로 오차의 요인은 이것에 의해 기인한 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 두 유체유동을 측정하기 위하여 micro PIV를 적용하였다. 이를 위해 작동유체로는 농도가 다른 글리세롤 수용액을 사용하였다. 그 결과 전반적으로 수치해석결과와 일치하는 결과를 보였다. 두 유체유동 측정 시 고려할 사항 중 하

나는 굴절률 차이인데, 본 연구에서는 굴절률의 영향이 그리 크지 않음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Beebe, D. J., Mensing, G.A. and Walker, G.M., 2002, "Physics and Applications of Microfluidics in Biology," Annual Review of Biomedical Engineering, Vol.4, pp.261~286.
- 2) Gobby, D., Angeli, P. and Gavriilidis, A., 2001, "Mixing Characteristics of T-Type Microfluidic Mixers," J. Micromech. Microeng., Vol.11, pp.126~132.
- 3) Liu, R.H., Stremmer, M.A., Sharp, K.V., Olsen, M.G., Santiago, J.G., Adrian, R.J., Aref, H. and Beebe, D.J., 2000, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.9, pp.190~197.
- 4) Stroock, A.D., Dertinger, S.K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A., Whitesides, G.M., 2002, "Chaotic mixer for microchannels," Science, Vol.295, pp.647~651.
- 5) Liu, Y.Z., Kim, B.J. and Sung, H.J., 2004, "Two-Fluid Mixing in a Microchannel," International Journal of Heat and Fluid Flow, in press.
- 6) Dorsey, N.E., 1940, *Properties of Ordinary Water-Substance*, Reinhold, New-York.
- 7) Ternstrom, G., Sjostrand, A., Aly, G. and Jernqvist, A., 1996, "Mutual Diffusion Coefficients of Water+Ethylene Glycol and Water+Glycerol Mixtures," Journal of Chemical Engineering Data, Vol.41 pp.876-879.
- 8) Hart, D.P., 2000, "PIV Error Correction," Experiments in Fluids, Vol.29, pp.13-22.
- 9) Scranio, F. and Riethmuller, M.L., 1999, "Iterative Multigrid Approach in PIV Image Processing with Discrete Window Offset," Experiments in Fluids, Vol.26, pp.513-523.
- 10) Meinhart, C.D., Wereley, S.T. and Gray, M.H. B., 2000, "Volume Illumination for Two-Dimensional Particle Image Velocimetry," Measurement Science and Technology, Vol.11, pp. 809-814.