

## 마이크로 혼합기 내의 유동 계측 및 혼합 특성 해석

성재용\* · 이인원\* · 김병균\*\* · 윤의식\*\* · 이인섭†

### Analysis of Mixing Performance and Flow Measurement Inside a Micro Mixer

Jaey-ong Sung · In-won Lee · Byoung-Gyun Kim · Eui-sik Yoon · In-Seop Lee

#### Abstract

To investigate the flow related to the mixing, micro PIV measurements were performed in the middle plane of the channel. A passive micro mixer analyzed in this work has been designed in the shape of a three-dimensional microchannel and fabricated with PDMS molding process by KAIST. The mixing performance was evaluated for different flow rates using phenolphthalein and sodium hydroxide solutions. Results show that mixing is enhanced by the increase of flow rate, which yields stronger secondary flows with helical streamlines.

**Key Words :** Micro Mixer(미소 유체 혼합기), Micro PIV(마이크로 PIV), Passive Mixing(수동 혼합), Polydimethylsiloxane(PDMS)

#### 1. 서론

미소 유체 시스템에서 유체의 혼합은 신약 개발, 약물 투여, 유전자 분석 등 많은 분야에서 필요로 한다. 특히 lab-on-a-chip 과 같이 각종 실험이나 분석을 하나의 칩 위에서 수행하기 위해서는 신속한 혼합을 통한 비용 및 시간을 절약하는 것이 무엇보다도 중요하다.<sup>(1)</sup> 일반적으로 미소 유체 채널에서는 레이놀즈수가 매우 작기 때문에 대부분의 유동이 층류 영역에 속한다. 따라서 대류(convection)에 의한 혼합보다는 확산(diffusion)에 의한 혼합이 지배적이며, 충분한 혼합을 위해서는 채널의 매우 길이가 길어져야 한다. 이는 혼합시간이 많이 소요된다는 단점과 함께 미소 유체 시스템을 집적화 하는데 있어 큰 장애가 된다. 그러므로 빠르고 효과적인 혼합이 가능한 미소 유체 혼합기의 개발은 최근 중요한 이슈로 부각되고 있다.

마이크로 스케일에서 혼합을 증진시키기 위한 방법은 많은 연구자들에 의해 다양하게 제시되어 왔다. 이 방법들은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 외부에서 에너지를 가하여 능동적으로 유동을 제어함으로써 혼합효율을 증가시키는 능동 제어방식<sup>(2)</sup>과 채널의 구조를 적절히 설계하여 유체 흐름을 변화시키는 수동 제어방식<sup>(3-4)</sup>이다. 전자의 경우 성능이 우수하다는 장점은 있으나 복잡한 기능으로 인해 제작과 시스템 집적화가 어려워 대부분 후자의 방법을 많이 사용한다.

한편, 미소유체유동에 대한 정량적 가시화에 대한 관심이 증가하면서 여러 가지 기법들이 소개되었는데, X 선 미소화상법<sup>(5)</sup>, Caged-dye PAF 법<sup>(6)</sup>, 마이크로 PIV 등이 그 것이다. 이 중 마이크로 PIV 는 Santiago 등<sup>(7)</sup>과 Meinhart 등<sup>(8)</sup>이 처음으로 개발하여 Hele-Shaw 유동과 채널 유동에 적용하였고, 최근 분해능이 향상되면서 가장 보편적인 미소유체 속도장 계측기법으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 KAIST 에서 연구되었던 PDMS 로 제작된 3 차원 채널구조의 수동 제어방식의 미소 유체혼합기를 고찰하고자 한다.<sup>(9)</sup> 기존 연구에서의 혼합성능은 지시액의 색깔변화를 통하여 측정되었다. 본 연구에서는 혼합기 내의 유동장을

\* LG 전자 디지털어플라이언스(연)

\*\* KAIST 전자전산학과

† LG 전자 디지털어플라이언스(연)

E-mail : islee12@dreamwiz.com

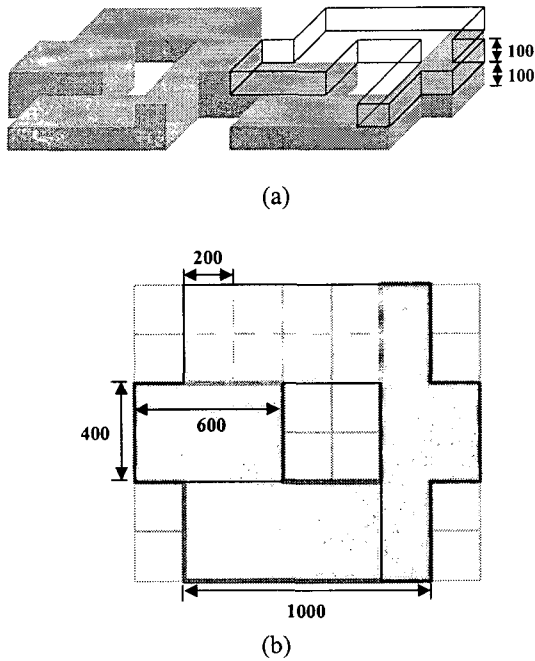


Fig. 1 Micro mixer fabricated by KAIST<sup>(9)</sup> in  $\mu\text{m}$  unit: (a) three-dimensional structure, (b) sectional dimension.

마이크로 PIV 시스템을 사용하여 계측하고, 그 측정된 결과를 바탕으로 채널 내 유속의 변화가 유체 혼합에 미치는 영향에 대하여 논의한다.

## 2. 실험장치 및 구성

본 실험에서 사용된 3 차원 구조의 채널을 가지는 미소 유체 혼합기는 기존의 발표된 구조와 동일한 구조인 Fig. 1 과 같이 두 개의 PDMS

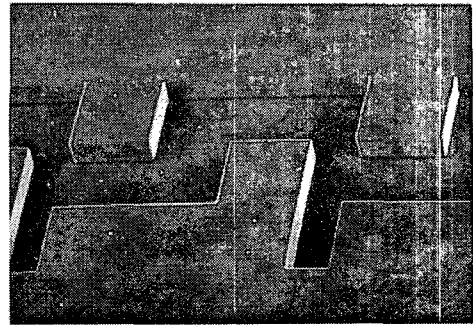


Fig. 2 SEM photograph of the PDMS micro channel fabricated by KAIST<sup>(9)</sup>.

(polydimethylsiloxane) 유로를 접합하여 제작된 구조이다. PDMS 는 실리콘이나 실리콘 산화막과 같은 다른 물질간의 접합이 뛰어나고 외부와의 연결이 용이하여 일반적으로 미소 유체 시스템에 많이 사용된다. 유체 혼합을 위해 사용된 유량은 각 유입구에 대하여 1, 2 ml/min 로 채널 폭을 기준으로 한 레이놀즈수는 각각 27.5, 55 가 된다. 유동은 두 대의 Syringe 펌프에 의해 동일 유량으로 구동되었으며, KAIST<sup>(9)</sup>에서 제작된 미소 혼합기의 SEM 영상은 Fig. 2 에서 볼 수 있다.

미소 유체 혼합기 내부 유동장을 계측하기 위하여 Fig. 3 에 보여진 바와 같은 마이크로 PIV 시스템을 사용하였다. 광원으로서는 532nm 파장을 가진 Nd:Yag 레이저를 사용하였으며, 미소 계측을 위해 확대비 20X, 개구수 0.42, 작동거리 20mm 인 대물렌즈를 CCD 카메라에 부착하였다. 산란입자는 620nm 직경의 형광입자를 사용하였는데, 이 입

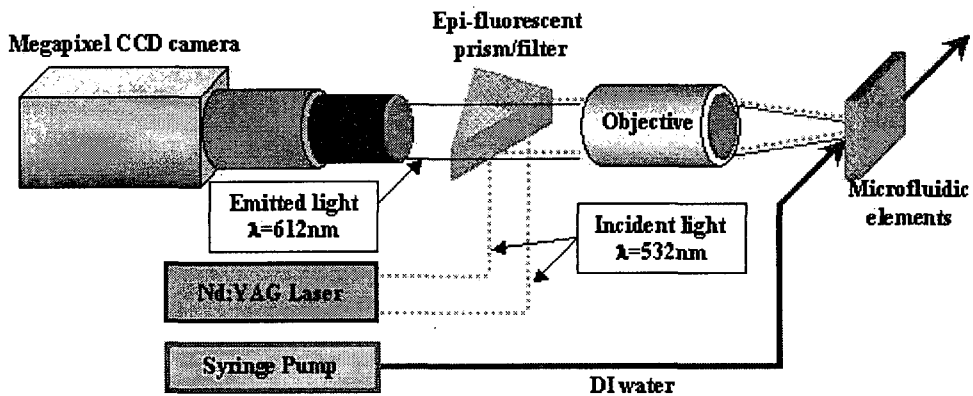
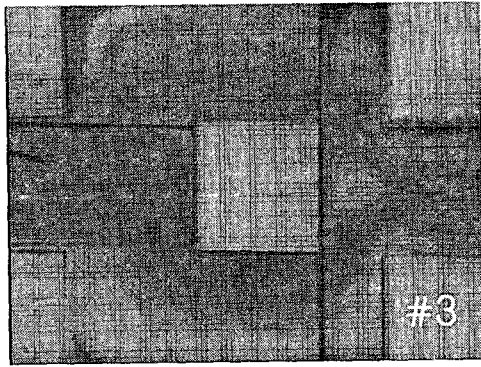
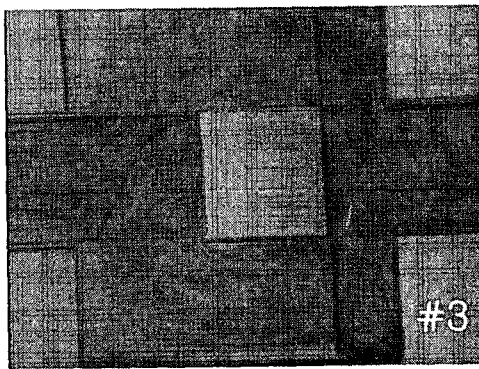


Fig. 3 Schematic diagram of the present micro PIV system.



(a)



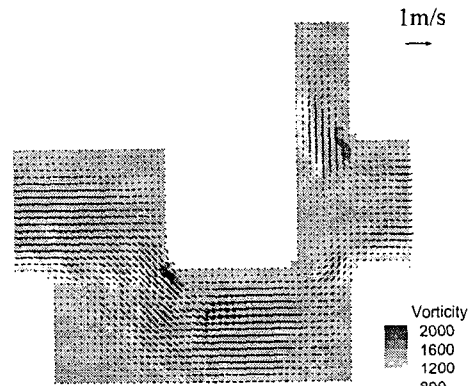
(b)

Fig. 4 Mixing evaluation in the third channel: (a) 1 ml/min, (b) 2 ml/min (See Reference 9 for details).

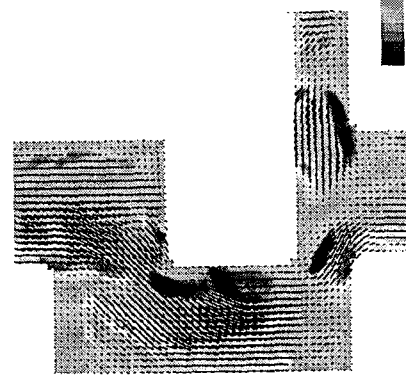
자는 레이저 광을 흡수하여 612nm 파장의 오렌지색 빛을 방출한다. 광원에 의한 배경 영상 노이즈는 오렌지색 필터를 이용하여 제거하였으며, 측정 영역의 크기는  $1500\mu\text{m} \times 1500\mu\text{m}$  이다. 속도장은  $32 \times 32$  픽셀 크기의 상관영역을 50% 중첩하여 계산하였다.

### 3. 결과 및 검토

유체 혼합 성능 실험을 위하여 각각의 유입구에 phenolphthalein 과 NaOH 를 에탄올에 희석한 용액을 주입하였다. Phenolphthalein 은 중성인 상태에서 무색이지만 pH 가 증가할수록 색이 진해지는 성질을 이용하여 두 용액의 혼합정도를 파악하였다.<sup>(9)</sup> Fig. 4 에서는 세 번째 단에서 현미경으로 관찰한 두 유체의 혼합정도를 나타내고 있다. 혼합정도는 CCD 영상에서 밝기의 균일도로부터 추정할 수 있으며, 가장 밝은 부분에 대한 편차의 평균값이 0 에 가까울수록 혼합이 잘 이루어진 것으로 판단할 수 있다. 그 결과 유속이 빠를 수록 혼



(a)



(b)

Fig. 5 Flow characteristics inside the micro mixer observed in the middle plane of the lower part: (a) 1 ml/min, (b) 2 ml/min.

합이 잘 일어남을 확인하였다. 이는 3 차원 채널 구조에서 유속이 증가하면 유로의 굴곡에 따른 2 차 유동의 크기가 증가하여 동일 거리에서 두 유체의 경계면이 넓어지기 때문이다.

Fig. 5 에서는 미소 혼합기 하단 채널의 중앙단면에서 관찰한 유동장 계측 결과를 보여주고 있다. 속도장은 50 장의 순간속도장을 평균하여 얻었으며, 와도의 분포와 함께 비교하였다. 레이놀즈수가 작은 층류 유동이므로 채널의 모서리 부근에서 재순환 유동은 관찰되지 않았다. 다만 유동이 상하 채널로 나누어지는 입구부분에서는 갑작스런 유동 방향 변화로 인한 약간의 역류 현상이 나타났다. 유량이 1ml/min 인 경우와 2ml/min 경우에 있어 전체적인 유동 형태는 비슷하며, 상하 채널의 유동이 만나는 우측 출구에서 유동의 3 차원성이 매우 강하게 나타남을 볼 수 있다. 지면에 수직방향으로 움직이는 유체와 수평방향으로 움직이는 유체가 만나면서 나선형 유선을 형성하고 이로 인해

유체 혼합이 증진된다. 유량이 클수록 나선형 속도 성분이 증가하고, 속도가 느린 부분과 빠른 부분의 차이가 커져 전단유동에 의한 혼합증진의 효과가 큰 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

3 차원 채널 형상의 미소 유체 혼합기를 제작하여 혼합유동의 특성을 고찰하였다. 두 개의 PDMS 채널을 접합하여 만들어진 미소 혼합기를 사용하여 그 성능 및 유동장을 측정하였다. 지시액에 의한 혼합성능 측정에서 유속이 빠를수록 혼합이 잘 되는 것으로 나타났다. 혼합 유동의 특성을 살펴보기 위하여 마이크로 PIV 유동 계측을 적용하였다. 그 결과 유속의 증가는 나선형 유선의 2 차 유동을 강하게 발생시켜 혼합을 위한 두 유체 경계면의 면적이 증가하는 것으로 해석되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Chiem, N., Colyer, C. and Harrison, J.D., 1997, "Microfluidic Systems for Clinical Diagnostics," *Transduce '97*, pp.183~186.
- 2) Evensen, H.T., Meldrum, D.R. and Cunningham, D.L., 1998, "Automated Fluid Mixing in Glass Capillaries," *Rev. Sci. Inst.*, Vol.69, pp.519~526.
- 3) Liu, R.H., Stremler, 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," *J. MEMS*, Vol.9(2), pp.190~196.
- 4) Stroock, A.D., Dertinger, K.W., Ajdari, A., Mezic, I., Stone, H.A. and Whitesides, G.M., 2002, "Chaotic Mixer for Microchannel," *Science*, Vol.295, pp.647~651.
- 5) Lanzillotto, A.M., Leu, T.S., Amabile, M., Wildes, R. and Dunsmuir, J., 1996, "Applications of X-Ray Micro-Imaging, Visualization and Motion Analysis Techniques to Fluidic Microsystems," *Proc. Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, Hilton Head.
- 6) Lempert, W.R. and Harris, S.R., 2000, "Flow Tagging Velocimetry Using Caged Dye Photo-Activated Fluorophores," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.11, pp.1251~1258.
- 7) Santiago, J.G., Wereley, S.T., Meinhart, C.D., Beebe, D.J. and Adrian, R.J., 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Exp. Fluids*, Vol.25, pp.316~319.
- 8) Meinhart, C.D., Wereley, S.T. and Santiago, J.G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," *Exp. Fluids*, Vol.27, pp.414~419.
- 9) Kim, J.-H., Kim, B.-G., Nam, H., Park, D.-E., Yun, K.-S., Yoon, J.-B., You, J. and Yoon, E., 2002, "A Disposable DNA Sample Preparation Microfluidic Chip for Nucleic Acid Probe Assay," *IEEE International MEMS Conference 2002*, pp.133~136.