

## 마이크로 채널에서의 열혼합 특성

박경배\* · 안준\*\* · 김병조\* · 이준식\*\*\*

### Thermal Mixing in a Microchannel

Kyoung Bae Park\*, Joon Ahn\*\*, Byoung Jo Kim\* and Joon Sik Lee\*\*\*

**Key Words :** Micro PIV(마이크로 PIV), Microchannel(마이크로 채널), Thermal Mixing(열혼합)

#### Abstract

Thermal mixing phenomena in a Y-type microchannel were investigated using a micro-PIV. Two inlet reservoirs of the microchannel were controlled individually so that the characteristics of thermal mixing in the channel with temperature difference were compared with those without the difference. The velocity field in the mixing process was measured using the micro-PIV system that includes an ICCD (Intensified CCD) camera. The mixing area and uniformity were also analyzed. It is observed that the flow fluctuation in spanwise direction is induced by temperature difference, which enhances mixing process in microchannels.

#### 1. 서론

최근 바이오기술에 대한 관심이 급증하면서 관련분야에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 미세전자기계시스템(MEMS, Micro-Electro-Mechanical System) 기술의 발달로 마이크로 펌프, 혼합기, 열교환기 등이 포함된 생체공학 제품이 개발되고 있으며 이와 관련된 미소유체역학(microfluidics) 분야 역시 새로운 연구분야로 주목받고 있다. 이와 같은 bio-MEMS 나 미소유체역학 분야에서 마이크로 구조물 내부를 흐르는 유체에 대한 유동정보는 마이크로 시스템 설계의 기본 자료가 될 뿐 아니라 시스템을 미세화하면서 생기는 일련의 문제점들의 해결에도 중요한 역할을 하게 된다.

미소유체역학 분야 중에서 마이크로 진단기(micro TAS) 등의 개발을 위해 미소영역에서 두 유체의 혼합효율을 높이는 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 기본적으로 마이크로 스케일 유동은 레이놀즈 수가 매우 작은 층류 유동이므로 유체 혼합이 운동량 전달보다는 분자 확산에 지배된다. 하지만 이러한 분자 확산에 의한 유체 혼합은 속도가 매우 느려서 혼합을 촉진하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있고 크게 능동형과 수동형 혼합으로 나누어 생각할 수 있다. 능동형 혼합은 전기력[1], 자기력[2], 마이크로 기포[3] 등의 외력을 이용하는 방식으로 효과적으로 혼합이 촉진되기는 하지만 부가적인 장치가 필요하여 제작이 어렵고 비용이 증가하게 된다. 수동형 혼합은 채널의 형상을 변화하여 유동이 적층을 이루게 하거나 회전하게 하여 혼합을 촉진시키는 방식으로 능동형 혼합기 보다 제작이 용이하고 가격이 저렴한 반면 혼합효과는 작다[4].

본 연구에서는 혼합하고자 하는 두 유체에 온도차를 부과하여 효율이 높은 수동형 혼합기를 개발하고자 한다. 두 유체의 혼합을 위해 마이크로 스케일의 Y형태 채널의 제작하고 두 입구에 온도차를 부과하였다. 혼합특성 파악을 위한 실험에는 마이크로

PIV를 도입하였다. 마이크로 PIV를 이용하여 채널 내부의 속도장을 측정하였고 입구 중 한 쪽에만 입자를 주입하는 방식으로 혼합 특성을 가시화하였다. 마이크로 PIV로부터 얻은 화상 자료를 정성적, 정량적으로 해석하여 온도차에 의한 혼합 증진 효과를 보이고 혼합에 영향을 미치는 요소들을 규명하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

열혼합을 활용하는 마이크로 혼합기는 Fig. 1(a)와 같이 Y형태의 채널로 설계하였다. 마이크로 채널의 재질은 PDMS(Polydimethyl-siloxan)이고 제작방법은 Fig. 1(b)와 같이 우선 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8 photo resist(PR)를 코팅한 후, 채널 모양이 디자인 된 마스크를 덮고 자외선을 노광하여 현상한다. SU-8은 negative PR이기 때문에 현상하고 나면 자외선 노광된 부분만 남게 된다. SU-8로 만들어진 채널 패턴 위에 액상의 PDMS를 붓고 굳힌 뒤, 고형화된 PDMS를 실리콘 웨이퍼에서 떼어낸다. PDMS에 reservoir용 구멍을 뚫고 세척 후 광학 현미경으로 관찰하기 위하여 0.17 mm 유리관 위에 플라즈마로 붙인다.

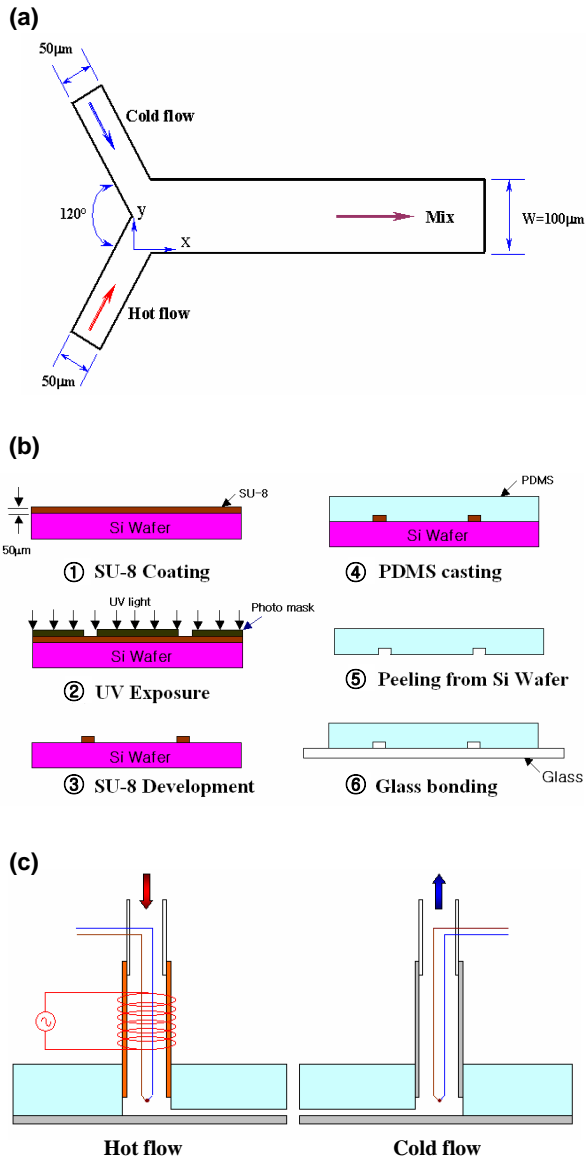
채널의 제작이 완료되면 Fig. 1(c)와 같이 마이크로 혼합기의 두 입구에 온도차를 형성하기 위해 뜨거운 유체는 동관을 예폭 시로 절연하고 열선을 감은 후 다시 예폭시로 절연하고 전력을 공급하여 열을 주었다. 온도를 측정하기 위하여 동관과 연결되는 부분에 고무관을 연결하고 작은 구멍을 뚫어 T형 열전대를 장착하였다. 차가운 유체의 경우 열선없이 동관대신 유리관을 사용하였고 뜨거운 쪽과 마찬가지로 고무관을 연결하고 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

실험장치는 Fig. 2와 같이 마이크로 PIV를 기반으로 마이크로 혼합기의 특성을 파악할 수 있도록 구성하였다. 혼합하고자 하는 유체는 자체 제작한 syringe 펌프를 사용하였다. syringe 펌프는 일반적으로 step motor로 제어하는 데 유량이 적을 경우 미세한 유동의 떨림이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 정속으로 회전하는 1800 rpm의 AC motor를 사용하고 빠른 회전수를 감속시키기 위하여 10:1, 60:1, 120:1의 기어박스를 직렬로 연

\* 서울대학교 대학원

\*\* 한국에너지기술연구원, jahn@kier.re.kr

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

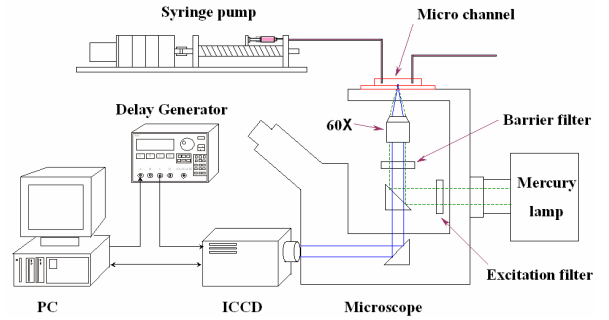


**Fig. 1** Micro mixer for the present study; (a) Schematic diagram and coordinate system; (b) Fabrication process; (c) Two inlets of the mixer

결하여 600,000:1, 1,200,000:1의 감속비를 구현하였다. 결과적으로 혼합기에는 실험조건에 따라 10.2  $\mu\text{L/h}$  또는 20.4  $\mu\text{L/h}$ 의 유량으로 시료가 공급된다. 작동유체는 증류수이고 PIV 실험을 위한 입자는 500 nm의 polymer microsphere를 주입하였다.

일반적인 PIV는 레이저를 광원으로 사용하여 측정면을 형성하고 입자로부터 산란되는 빛을 신호로 이용하지만 본 연구에서는 수은램프를 광원으로 측정체적 전체를 비추었고 형광입자를 사용하여 광량을 확보하였다. 작동유체의 유속이 느리므로 펄스 레이저를 사용하지 않고 ICCD의 지연시간과 노출시간을 조절하여 PIV를 구현하였다. 두 영상간의 지연시간과 노출시간은 각각 0.3, 0.7 ms로 하였다. 본 연구에서 사용한 형광입자는 수은 램프의 녹색광을 흡수하여 붉은 빛( $\lambda \sim 610 \text{ nm}$ )을 방출한다. 형광필터를 통해 붉은색 형광만이 기록되어 영상처리과정을 거치게 된다.

ICCD 카메라에 기록되는 입자의 크기( $d_e$ )는 다음과 같이 주어



**Fig. 2** Schematic diagram of experimental setup

진다. [5]

$$d_e = \sqrt{(Md_p)^2 + d_s^2} \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 대물렌즈의 배율,  $d_p$ 는 입자의 크기,  $d_s$ 는 식(2)로 표현되는 spread함수가 만드는 가장 작은 지름이다.

$$d_s = 1.22(1 + M)\lambda NA^{-1} \quad (2)$$

여기서  $d_e = 44.2 \mu\text{m}$ 로 계산되고 ICCD의 화소 크기가  $6.7\mu\text{m}$ 이므로 기록되는 입자의 크기는 6.6화소를 차지한다.

마이크로 PIV에서는 측정체적 전체를 조명하므로 측정하고자 하는 영역의 두께는 대물렌즈의 초점으로 조절하고 두께는 식(3)과 같이 표현할 수 있다. [6]

$$\delta z = \frac{n\lambda}{NA^2} + \frac{ne}{MNA} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 대물렌즈와 측정대상물 사이의 유체의 굴절률로 본 연구에서는 oil immersion이므로 1.515의 값을 갖는다.  $e$ 는 ICCD의 화소크기이다. 마이크로 PIV에서 out-of-plane 공간분해능( $\Delta z$ )은 다음과 같다.

$$\Delta z = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16nd_p}{NA} + d_p \quad (4)$$

위의 값들을 대입하여 계산하면  $\delta z$ ,  $\Delta z$ 는 각각 0.5, 3  $\mu\text{m}$ 이다.

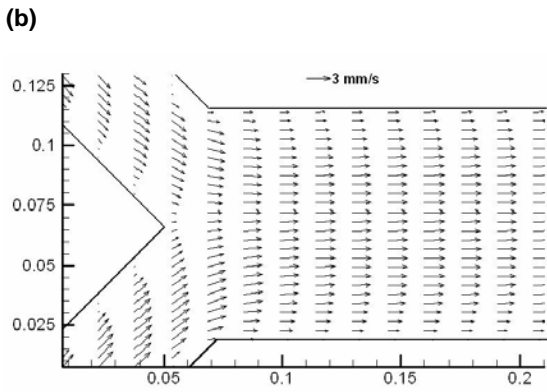
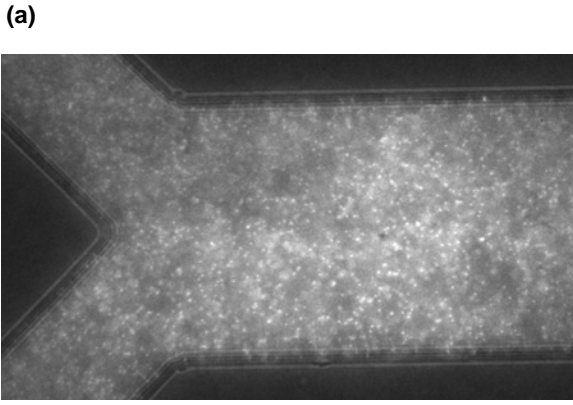
Interrogation window의 크기는  $64 \times 64$ 화소로 하였다. 속도장의 변화를 잘 보기 위하여 y방향으로 75%의 중첩을 하였다. 결과적인 공간해상도는  $15 \times 3.8 \times 3 \mu\text{m}$ 이다.

PIV를 위한 입자는 유동에 영향을 주지 않고 마이크로채널이 막히지 않을 만큼 작아야 하지만 형광영상이 ICCD 카메라에 포착되고 브라운운동이 무시될 수 있을 정도의 크기는 가져야 한다. 위의 조건을 고려했을 때 입자의 크기  $d_p$ 는 300 nm ~ 1 mm 정도가 적당하고 본 연구에서는 500 nm의 입자를 사용하였고 비중량은 1.055이다. Brown운동에 따른 입자의 운동 상대 오차를 식(5)에 의해 구해보면 [7] 약 4.7%로 계산된다.

$$\epsilon_B = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (5)$$

Brown운동은 unbiased 특성을 가지므로 ensemble 평균을 취하면 그 오차값을  $\epsilon_B/\sqrt{N}$ 으로 낮출 수 있고 본 실험의 경우 0.7% 이내로 제한된다.

속도장은 획득한 입자 영상을 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하여 cross-correlation한 후 correlation의 single peak을 찾아 순간 속도 벡터를 정의한다. 각 입자 영상의 계산된 순간속도를 평균하여 시간 평균 속도장을 구한 다음, 상관 영역을 평균 속도만큼 이동시켜 각 입자 영상에 대해 다시 cross-correlation을 평균하여 마지막으로 single peak의 위치를 정의하면 average c



**Fig. 3** Velocity field in the mixer; (a) Particle image for the PIV measurement; (b) Ensemble time averaged velocity field

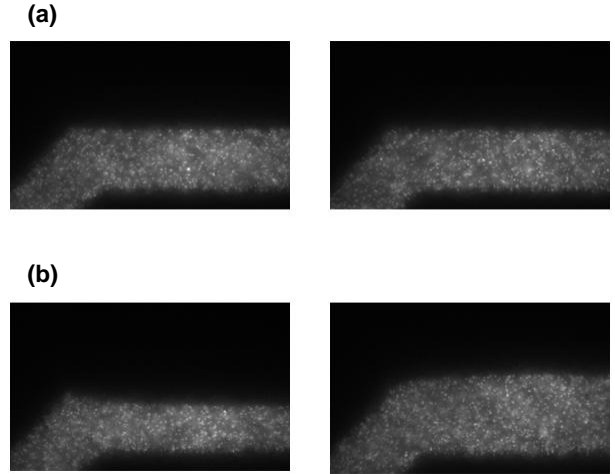
correlation 기법에 의한 속도를 구하게 된다.

실험은 온도차를 준 경우와 온도차가 없는 경우, 속도장을 측정하는 경우와 혼합특성을 보는 경우로 나누어 진행하였다. 작동유체는 증류수로 속도장을 측정하는 경우 양쪽 입구 모두, 혼합 특성을 보는 경우 뜨거운 유체 측에만 형광입자를 약 0.09%의 농도가 되도록 혼합하였다. 약 2시간 정도 syringe 펌프를 작동시켜 유동이 정상상태가 된 후 실험을 수행하였고 온도차가 있는 경우 유동이 정상상태에 도달한 이후에 전원을 공급하여 온도차를 형성하였다. 유동장 및 온도장이 정상상태에 이르면 ICCD로 사진을 얻어 분석하여 속도장 및 혼합특성을 파악하였다.

### 3. 결과 및 토의

Y형 마이크로 채널의 두 입구 reservoir에서 같은 온도를 유지시키면서 유체를 흘릴 경우 특별한 혼합 없이 층류를 이루며 흐른다. Fig. 3(a)에 보인 영상은 마이크로 채널과 추적입자를 모두 보이게 하기 위하여 수은 램프와 할로겐 램프를 동시에 비추고 촬영하였다. 속도장을 구할 경우에는 수은 램프만을 작동하고 영상을 획득하였다. 이 영상들을 바탕으로 Fig. 3(b)와 같은 속도장을 구하였다. 각 branch에서 유체가 포물선에 가까운 형태로 점점 부근에 유입되어 좁은 영역의 전단층이 생기고 곧 완전발달된 유동이 된다.

유동이 완전발달된 후 전원을 이용하여 열선에 전류를 가하고



**Fig. 4** Particle images from the flow visualization; (a)  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ ; (b)  $\Delta T = 5^\circ\text{C}$

두 reservoir의 온도차이를  $5^\circ\text{C}$ 로 유지하였다. 두 reservoir의 온도차이가 없는 경우 Fig. 4(a)처럼 두 유체의 계면이 안정되어 있고 온도차이를  $5^\circ\text{C}$ 로 하여 유체를 흘릴 경우 Fig. 4(b)와 같이 두 유체의 계면이 상하로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 계면의 온도차에 의한 현상으로 보인다. 이러한 움직임에 의해 두 유체의 접촉면적이 증가하여 혼합이 촉진된다.

정량적으로 두 유체의 혼합 정도를 알아보기 위하여 계면에서 수직인 속도성분을 비교하였다. 양쪽 입구에 형광입자가 혼합된 증류수를 흘리고 온도차이를 준 뒤, 1초 간격으로 연속적인 100장의 속도를 구하고 이 속도장을 바탕으로 y방향 속도성분의 RMS값을 계산하여 채널의 중간 지점에서 x방향을 따라가면서 Fig. 5에 제시하였다. 이때 두 reservoir의 온도차는  $5^\circ\text{C}$ 이고, syringe 펌프의 유량을  $20.4 \mu\text{l/h}$ 로 하여, 1초 간격을 두고 100장의 영상을 획득하여 계산하였다. 두 유체가 만나면서 점점 RMS값이 커지다가  $x/D_h = 0.4$ 부근에서 최대값을 갖고  $x/D_h = 1$  이후에는 거의 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 열혼합에 의한 혼합촉진도 점점 부근에서 집중적으로 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

열혼합을 정량적으로 파악하기 위하여 사진의 intensity값을 이용하여 식(6)과 같이 정의되는 혼합균일도를 계산하였다.

$$C_{dev} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (I_i - \bar{I})^2}}{2^{bit} - 1} \quad (6)$$

여기서  $I$ 는 명도,  $N_p$ 는 계산 점의 수, bit는 gray scale의 비트 수를 의미한다.  $C_{dev}$ 는 단면에 걸친 명도 분포에 대한 표준편차이므로 값이 작을수록 혼합이 잘 되는 것을 의미한다.

Figure 6은 reservoir의 온도차와 위치에 따른 혼합균일도를 나타낸다. 일정한 온도차에서 상류와 하류를 비교해보면 하류 위치( $x/W = 1.65$ )에서 상류( $x/W = 0.15$ )에서보다  $C_{dev}$ 값이 작은 것을 볼 수 있다. 이는 유동이 흘러가면서 혼합이 진행되고 있음을 의미한다. 동일한 위치에서 온도차의 영향을 보면, 온도차가  $5^\circ\text{C}$ 인 경우,  $0^\circ\text{C}$ 인 경우  $C_{dev}$ 값이 작게 나타났다. 이는 열혼합에 의해 혼합이 촉진되었음을 의미한다.

### 4. 결론

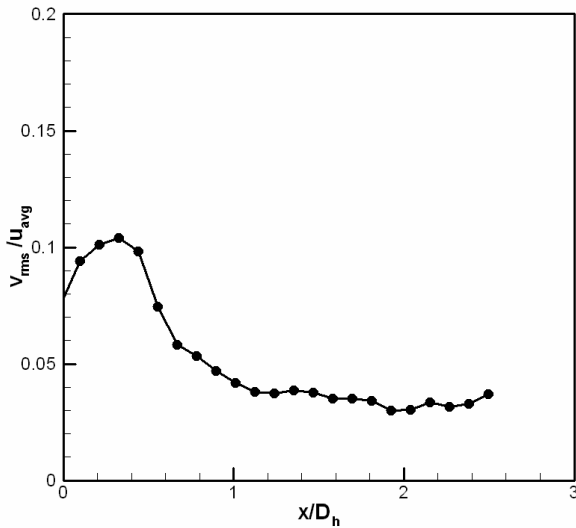


Fig. 5 Velocity fluctuation at the mixing interface

본 연구에서는 Y형 마이크로채널에 서로 다른 온도의 유체를 공급하며 혼합특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Y형 채널의 두 branch에서 공급되는 유체의 온도가 다른 경우에도 시간 평균 속도장은 변화하지 않았고, junction으로부터  $1 D_h$  하류 이후에는 완전 발달된 채널 유동형태를 보였다.
2. 한쪽 branch에만 형광물질을 넣어 가시화한 결과 온도차가 있는 경우 계면이 junction 근처에서 상하로 움직이는 것을 관찰하였다.
3. 형광입자의 intensity를 분석한 결과 온도차에 의해 혼합이 증진되었음을 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] M. H. Oddy, J. G. Santiago, J. C. Mikkelsen, "Electrokinetic Instability Micromixing," *Anal. Chem.*, vol. 73 (2001), pp. 5822-5832.
- [2] H. Suzuki, N. Kasagi, C. M. Ho, "Chaotic Mixing of Magnetic Beade in Micro Cell Separator," *Proc. 3rd Int. Symp. Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Sendai Japan, June

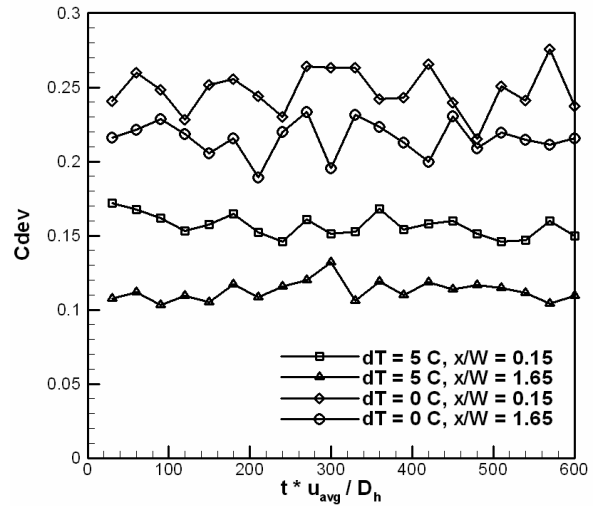


Fig. 6 Time history of the intensity deviation

24-27 (2003).

- [3] J. H. Tsai, L. Lin, "Active Microfluidic Mixer and Gas Bubble Filter Driven by Thermal Bubble Micropump," *Sensors and Actuators A*, vol. 97 (2002), pp. 665-671.
- [4] R. H. Liu, M. A. Stremler, K. V. Sharp, M. G. Olsen, J. G. Santiago, R. J. Adrian, H. Aref, D. J. Beebe, "Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 9 (2000), pp. 190-197.
- [5] J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, R. J. Adrian, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Experiments in Fluids*, vol. 25 (1998), pp. 316-319.
- [6] C. D. Meinhart, S. T. Wereley, J. G. Santiago, "PIV Measurements of a Microchannel Flow", *Experiments in Fluids*, vol. 27 (1999), pp.414-419.
- [7] Y. K. Lee, P. Tabeling, C. Shih, C. M. Ho, "Characterization of a MEMS fabricated Mixing Device," *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, Florida, November 5-10 (2000), pp. 505-511.