

마이크로 PIV를 이용한 마이크로 분지관에서의 유동해석

윤 상 열* · 김 경 천†

(2004년 1월 15일 접수, 2004년 7월 16일 심사완료)

Analysis of Flow in a Microchannel Branch by Using Micro-PIV Method

Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

Key Words : Microfluidics(미세유체소자), Micro-PIV(마이크로 입자영상유속계), Micro-Branch(마이크로 분지관), Flow Anaysis(유동해석)

Abstract

Micro-resolution Particle Image Velocimetry(Micro-PIV) was used to measure the flow in a micro-branch(Micro-Bypass). In this paper, effects of particle lump at the tip of a Micro-branch and difficulties of Micro-PIV measurements for microfluidics with branch passage were described. Micro-bypass was composed of a straight channel(200(100) μm width \times 80 μm height) and two branches which has 100(50) μm width \times 80 μm height. One of branches was straight and the other was curved. Experiments were performed at three regions along streamwise direction(entrance, middle and exit of branch) and five planes along vertical direction (0, ± 10 , $\pm 20 \mu\text{m}$) for the range of $Re=0.24, 1.2, 2.4$. Numerical simulation was done to compare with the measurements and understand the effects of particle lump at the tip of branch. And another fluid(3% poly vinyl Alcohol aqueous solution) were adapted for this study, so there were no particle sticking. In this case, we could get velocity difference between straight and curved branches.

기호설명

- x : 유동방향
- y : 유동의 수직방향
- h : 채널 상하중심으로부터의 높이
- Q : 유량
- Re : 레이놀즈 수

1. 서론

Lab-on-a-chip, μ -TAS(Micro Total Analysis System) 등의 마이크로 시스템은 다양한 형태의 microfluidics를 포함하고 있으며, 따라서 이러한 각 미세유체요소의 상세한 테스트 및 검증은 마이크로 유체시스템을 설계/제작/개발하는 데 있어 필수적

이다. 더욱이 마이크로분지관 형태의 유체소자는 대부분의 미세유체시스템에 적용되고 있는 미세유체소자 중 하나이며, 본 연구에서는 이러한 분지관과 합지관이 조합된 micro-bypass에 대해 유속분포를 조사하였다. Micro-bypass에 대한 연구는 최근 의료분야의 혈관이식 등 혈액유동과 관련하여 진행되고 있으며⁽¹⁾ 이 밖에 μ -TAS 관련한 유동제어, 검출 등의 목적으로 연구되고 있다. 특히 최근 micro-bypass는 직관과 곡관의 압력강하에 따른 유속 차와 채널의 길이 차를 이용하여 droplet을 이등분하여 크기조절을 하고 이를 다시 mixing 하는 데 이용된다.

또한 최근 개발된 Micro-PIV기법으로 미세유체소자 내부의 수 마이크로 단위의 상세한 유속분포를 획득하는 것이 가능해졌다. 이러한 Micro-PIV 기법은 Santiago 등에 의해 개발되어⁽²⁾ 적용범위에 따라 다양하게 응용/개발되고 있으며, 현재 미세유체소자의 내부유동장 계측을 위한 유일한 방법으로 인정되고 있다.⁽³⁻⁶⁾ 그러나 PIV계측 시 사용되는 수백 나노미터 사이즈의 형광입자는 점착성을 가지고 있으며 이러한 특성은 때때로 micro-PIV계측을 힘들게 하는 요인으로 작용한다.⁽⁵⁾ 나아가 이

† 책임지자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2324 FAX : (051)515-7866

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

러한 부작용제로 인해 유동에 미치는 영향 때문에 예측과는 다른 계측결과를 야기하기도 한다. 특히 최근 응용되고 있는 마이크로 시스템 중 많은 경우는 입자를 포함한 유동이며 분지관 등에서의 부작용으로 인해 예측과는 다른 유동을 형성하게 된다.

본 연구에서는 마이크로 시스템의 한 부분으로 사용되고 있는 곡관과 직관으로 구성된 마이크로 분지관과 합지관의 형태인 micro-bypass에 대해 Micro-PIV를 적용하여 내부유동을 측정하고자 하였다. 이는 micro-bypass의 곡관과 직관의 유속차이의 정도를 파악하여 droplet 분리 및 혼합을 위한 micro-droplet mixer를 설계함에 있어 기본 데이터를 확보하는데 목적이 있다. 동시에 유사한 형태의 미세유체소자에 대해 Micro-PIV 계측 기법을 적용함에 있어 발생하는 제반 문제점 뿐 아니라 유사한 문제를 안고 있는 마이크로 시스템에 입자가 포함된 유동의 경우 입자 부착이 유동에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Micro-Bypass

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 micro-bypass의 형상을 나타내며, 직관과 곡관으로 나누어져 있다. 전후 단일 직관의 단면형상은 $200(100)\mu\text{m}$ (폭) \times $80\mu\text{m}$ (높이)를 가진 직사각형 채널이며, 분지된 곳에서의 직관과 곡관의 단면형상은 $100(50)\mu\text{m}$ (폭) \times $80\mu\text{m}$ (높이)를 가진 직사각형 채널이다. 채널의 상부는 1mm 두께의 유리관으로 덮여있으며, 채널은 실리콘웨이퍼로 제작되었다. 실험은 두 가지 치수의 micro-bypass에 의해 행해졌으며 1차실험 시의 채널상의 문제점을 수정하여 위의 괄호안의 치수로 변경하여 제작되었다. 측정은 분지되는 지점 (Position 1), 분지된 관의 중심영역(Position 2), 다시 합쳐지는 부분(Position 3)에서 각각 측정되어졌으며, 채널의 중심단면과 중심으로부터 $0, \pm 10\mu\text{m}$ 단면에서 측정되어졌다.

2.2 Micro-PIV 측정

Fig. 2는 본 연구에서 마이크로채널의 측정을 위해 사용된 Micro-PIV 장치의 개념도를 나타낸다. 본 연구를 위한 micro-PIV시스템은 형광현미경, Nd-YAG 레이저, 12bit cooled CCD camera, synchronizer로 구성되어졌다. 형광현미경(IX-51, Olympus)의 내부에는 550nm 이상의 파장을 통과시키는 high pass filter가 장착되어 입자로부터 형광되는 영상만을 투과시켜 획득되도록 하였으며, 20X 대물렌즈가 사용되었다. 광원으로는 532nm 파장의 dual Nd-Yag 레이저가 사용되었으며 레이저 빔은 렌즈의 조합에 의해 확대되어 조사되었다. 화상획득을 위해 1280×1024 해상도의 12bit cooled CCD

camera(PIVCAM 13-8, TSI)가 사용되었다. Micro-PIV 계측을 위해 사용된 입자는 $1\mu\text{m}$ 직경의 형광입자가 사용되었으며 (fluorescent sphere, Excitation: 535nm/Emission:560nm), 532nm 파장의 Nd-Yag 레이저에 조사되었을 경우 약 560nm 파장의 빛을 방출한다. 유동의 형성을 위해 syringe pump가 사용되었다. 화상으로부터 속도벡터의 추출을 위해 12bit 처리와 Micro-PIV를 위해 본 연구실에서 자체 개발한 PIVACE로부터 2 frame cross correlation 기법이 사용되었으며, 이때의 depth of correlation은 약 $10\mu\text{m}$ 정도이다. 화상해상도는 $350\text{nm}/\text{pixel}$ 정도이며, 세로 영역의 공간해상도를 높이기 위해 추적 구간을 24×48 로 직사각형의 형태를 취하였으며, 실제 속도벡터장은 가로 $8.4\mu\text{m}$ \times 세로 $4.2\mu\text{m}$ 벡터간격의 해상도를 가진다. 평균을 위한 앙상블 개수는 200이었다. 입자의 부착에 의한 유동에의 영향을 파악하기 위한 전산해석을 위해 CFDACE ver.6.6 이 사용되었다.

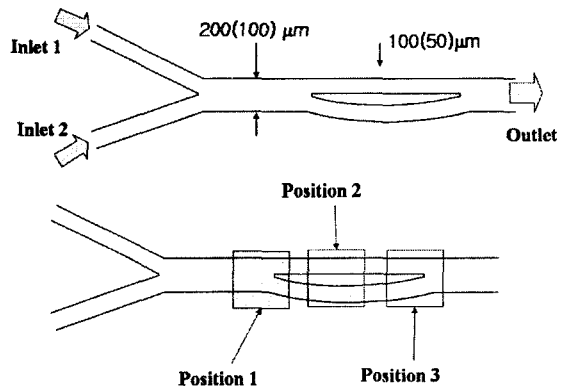


Fig. 1 Schematic of the micro-bypass and measurement positions

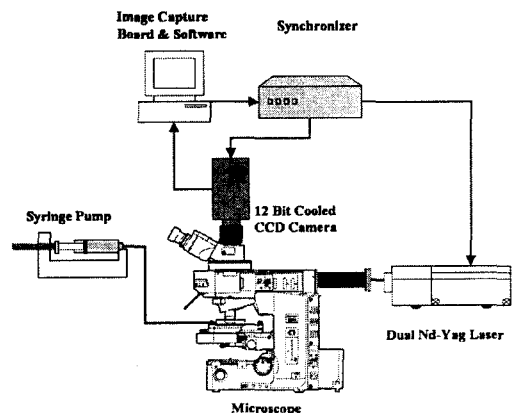


Fig. 2 Schematic of the Micro-PIV measurements

2.3 실험조건

실험을 위해 2가지 작동유체가 사용되었으며 1차 실험 시 DI-water를 사용하였고, 실험을 위한 유량조건은 2, 10, 20 μ l/min이었으며 이에 해당하는 평균유속은 약 2.1, 10.4, 20.8mm/s이다. 각각의 레이놀즈수는 약 0.24, 1.2, 2.4로 아주 낮은 레이놀즈수이며 층류에 해당한다. 그리고 유입은 두 개의 입구에서 각각 절반에 해당하는 1, 5, 10 μ l/min 씩 동일 유량이 유입되도록 하였다. 2차 실험 시 입자가 부착되는 현상을 고려하여 점성이 다소 높으며 향후 본 연구결과를 통해 응용되어질 분야에서 사용되어지는 알코올수용액(3% poly vinyl Alcohol aqueous solution)이 사용되었다. 이 경우 적용된 유량은 2.5 μ l/min이었다.

3. 입자부착에 의한 영향

3.1 Micro-Bypass 에서의 입자부착현상

Fig. 3(a)는 micro-bypass에 입자가 부착된 모습을 나타내며, Fig. 3(b)는 시간이 흐름에 따라 분지관의 시작지점에서 점차 입자가 쌓여가는 모습을 보여주고 있다. 입자의 부착은 분지되는 영역에서만 나타나고 있으며 합지되는 영역에서는 나타나지 않고 있다. 이는 분지되는 곳은 유동이 정체되는 지점으로 입자가 상대적으로 잘 부착될 수 있다고 판단된다.

Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 부착된 입자 덩어리는 채널을 막을 정도로 자라며 본 연구에서는 약 10-20분 정도 소요된 이후에는 심각하게 커짐을 알 수 있었다. 그리고 Fig. 3(b)에서 입자는 비대칭적으로 특히 직관쪽에 크게 형성됨을 알 수 있고 이는 유동에 직접적인 영향을 미칠 것임을 예상할 수 있다.

Fig. 4는 micro-bypass의 분지영역의 형상이며, 제작시의 문제로 움푹 패인 형상을 볼 수 있는데 이로 부터 입자의 부착이 쉽게 이루어진 것이라 판단된다.

3.2 입자의 부착시의 유동장측정

또한 Fig. 5는 채널의 상하 중심, 그리고 중심으로부터 아래위 $\pm 10\mu$ m 지점에서 측정한 결과이며 유량 2 μ l/min일 때이다. 실험은 +10 μ m에서 -10 μ m 위치로 이동시키며 실험이 이루어졌으며 시간이 흐름에 따라 점차 입자의 부착정도가 심해지며 물론 유동 또한 변해짐을 알 수 있다. 또한 +10 μ m와는 달리 중심과 -10 μ m 지점에서의 유속분포를 볼 때 상류의 y=0 부근에서 상당히 느린 피이크를 가지는 덜 발달된 형태를 가짐을 확인할 수 있다. 이것은 획득된 입자영상을 살펴본 결과 중심근처의 입자분포가 아주 적음으로 인한 추출시의 에러

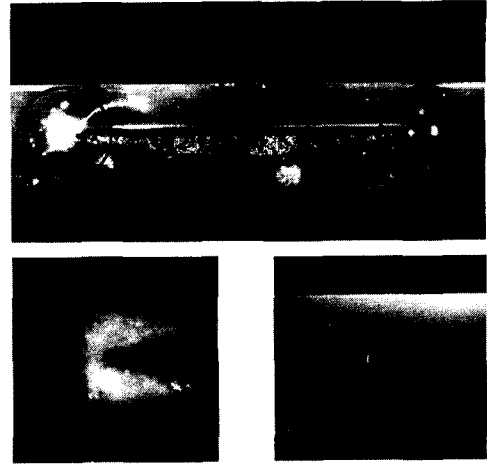


Fig. 3 (a) Particle sticking at the entrance of the bypass



Fig. 3 (b) Particle sticking with time

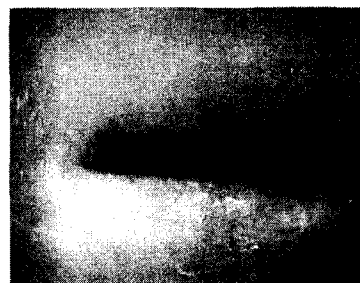
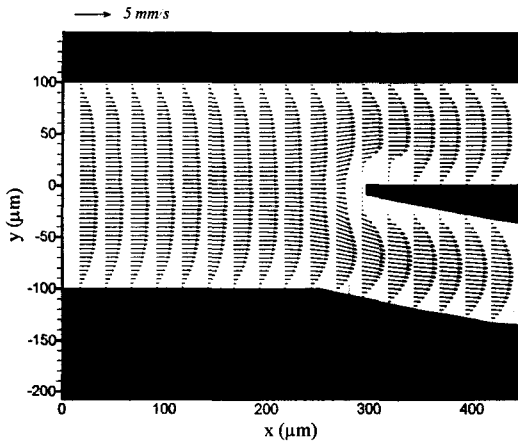
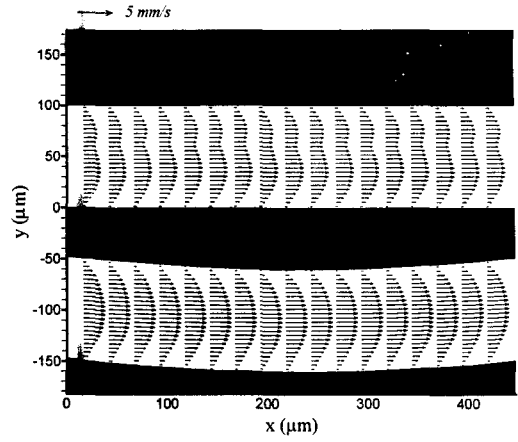


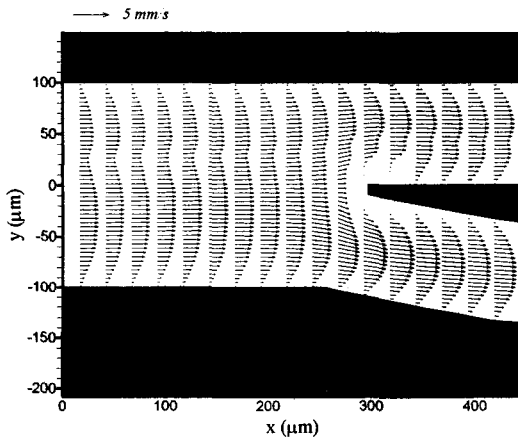
Fig. 4 Shape of the entrance of the bypass



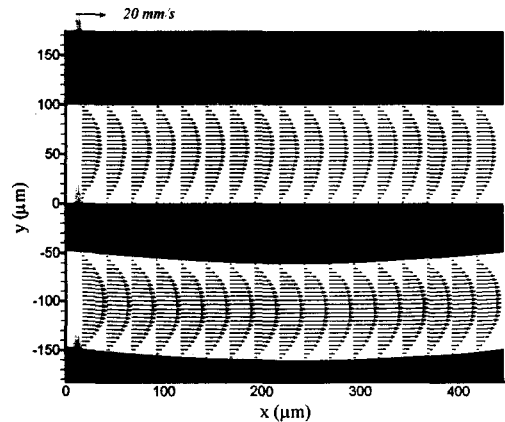
(a) $h = +10\mu\text{m}$



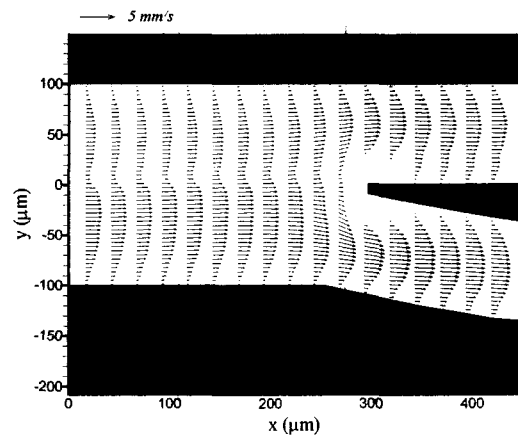
(a) $Q=2\mu\text{l/min}$



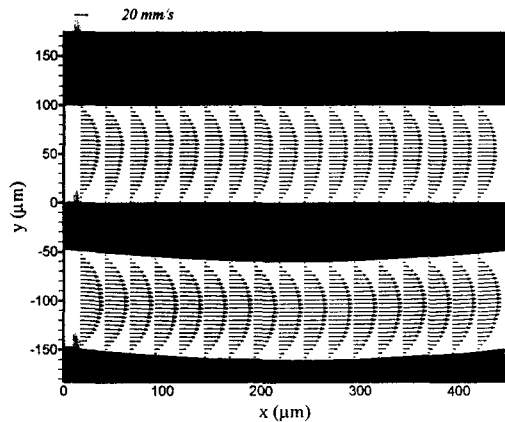
(b) $h = 0\mu\text{m}$



(b) $Q=10\mu\text{l/min}$



(c) $h = -10\mu\text{m}$

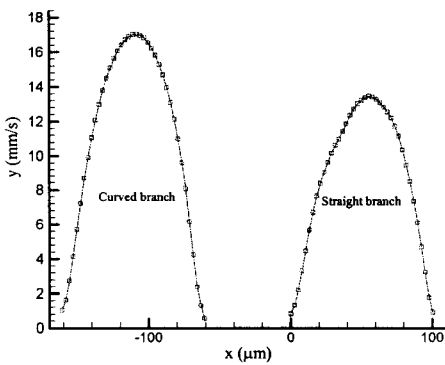


(c) $Q=20\mu\text{l/min}$

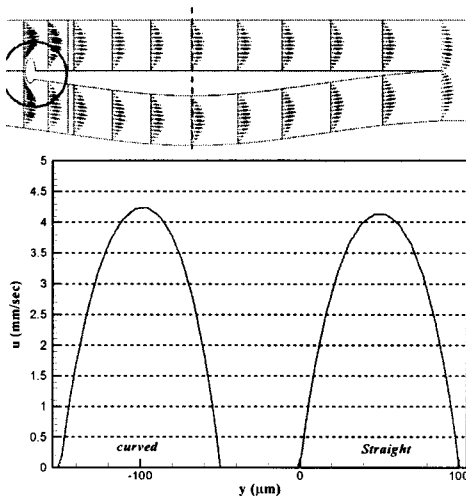
Fig. 5 Velocity fields at Position 1; $Q = 2 \mu\text{l/min}$

Fig. 6 Velocity fields at Position 2; $h = 0 \mu\text{m}$

로 인한 것이라 판단된다. 이러한 입자가 드문 영역이 중심 부근에 존재하는 이유는 유입이 두 곳으로 이루어 짐으로 인해 물질전달이 되지 않아 채널의 중심영역의 입자분포가 제대로 이루어지지 않은 점과 벽면 부착에 의한 영향이 작용했을 것이라 판단된다. 따라서 분지관 형태의 마이크로채널이나 마이크로채널 내부에 장애물이 있는 곳에서의 Micro-PIV의 적용은 상당히 신중해야 하며, 입자가 사용되는 microfluidics에서는 입자가 붙어 영기는 현상에 대해 주의해야 함을 알 수 있다. 이러한 결과는 채널측정 시 예상되기 어려우며 채널 내부의 벽면의 상태, 측정 중의 입자의 부착 정도 등의 차이에 따라 2차원성 또한 유지되기 어렵다고 판단된다. 또한 여기서도 분지관 시작지점에 부착된 입자덩어리의 영향을 확인할 수 있다.



(a) Experimental results (Re = 1.2)



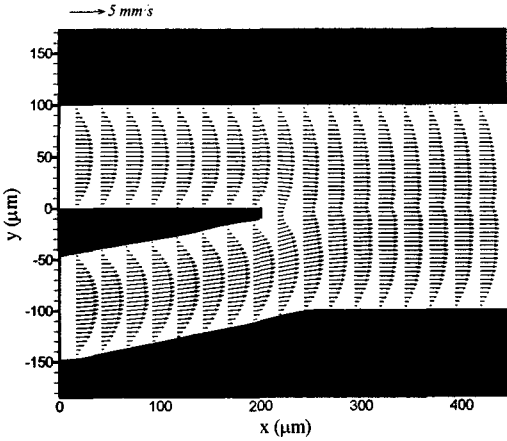
(b) Computational results (Re=0.24)

Fig. 7 Velocity comparison between curved and straight branches

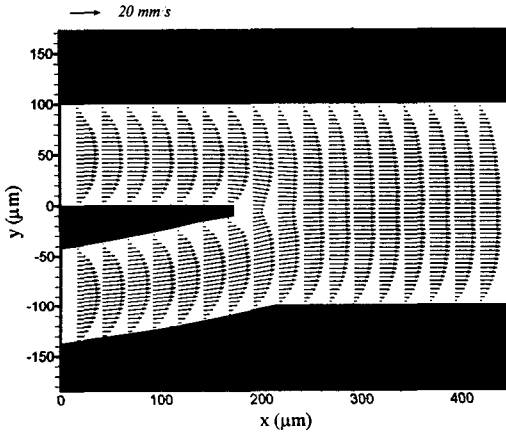
Fig. 6은 분지된 영역의 상하 중심면에서 유량 $Q = 2, 10, 20 \mu\text{l}/\text{min}$ ($Re = 0.24, 1.2, 2.4$)으로 변화시켜 측정된 결과이다. 유량 $2 \mu\text{l}/\text{min}$ 의 경우 직관에서는 여전히 초기 중심저속영역이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이 또한 획득된 영상을 통해 앞서의 입자분포가 낮은 검은 띠 형태의 영역이 지속되어있음을 확인할 수 있었다. 다른 두 경우(10, $20 \mu\text{l}/\text{min}$) 이러한 영역이 존재하지 않음을 알 수 있으며, 따라서 레이놀즈 수가 1보다 작은 매우 느린 유동에서는 상하 물질전달이 거의 일어나지 않음을 알 수 있으며 PIV계측 시 유의하여야 함을 알 수 있다.

Fig. 7은 직관과 곡관에서 유속차이를 나타내고 있으며 (a)는 실험결과이고 (b)는 전산결과이다. 실험을 통한 결과에서 직관과 곡관의 유속차이를 비교해보면 약 5-10% 정도 곡관이 빠름을 확인할 수 있는데, 이것은 유로의 저항 등을 고려할 때 직관내의 유속에 곡관일 때보다 빨라야 함에도 불구하고 반대의 경향을 나타내고 있다. 이는 앞서의 입구유동의 영향을 주는 인자인 입자의 부착되는 정도에 따른 압력분포의 변화에 대한 효과라 판단되며 곡관과 직관의 형상차이에 의한 유동의 차이라고 볼 수 없다. Fig. 7(b)는 전산해석에 의한 결과이며 $Re=0.24$ 일 때이다. 분지되는 영역에 입자가 영겨있는 것을 타원으로 모델링하여 계산하였다. 이 경우 실험에서처럼 곡관영역에서 속도가 약 3%정도 빠름을 알 수 있었으며 실험과의 차이는 입자의 부착에 대한 정확한 모델링은 어렵기 때문으로 경향성에 대한 확인을 위해 행해졌다.

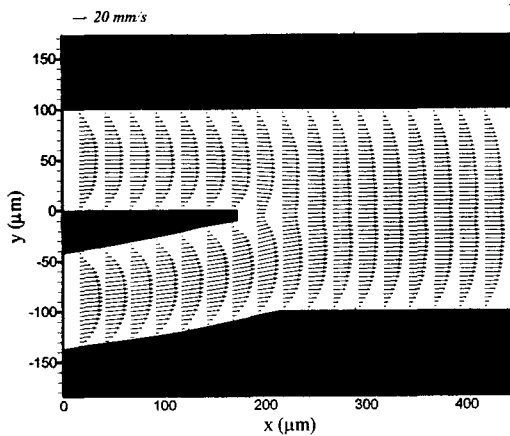
Fig. 8은 다시 합쳐지는 영역에서 앞서의 Fig. 6에서와 동일 유량조건들에 대한 측정 결과이다. 다시 합쳐진 이후의 유속분포로 보아 $2 \mu\text{l}/\text{min}$ 의 경우 유동의 발달이 상당히 느리며 오랜동안 동일한 분포를 유지함을 확인할 수 있다. 여기서도 합쳐진 지점에서 입자가 없는 영역에 의한 결과임을 확인할 수 있었다. 그러나 10, $20 \mu\text{l}/\text{min}$ 유량의 경우 분지관 이후 상당히 빠른 발달이 이루어짐을 알 수 있다. 그 외의 유속분포는 유량에 따라 그다지 큰 차이는 없으며 여전히 곡관의 속도성분의 크기가 약 5-10%정도 빠름을 알 수 있다. 그러나 순간 속도장에서는 직관이 빠른 경우 또한 측정되었으므로, 종합적으로 판단해볼 때 분지관 입구에서 입자의 부착형상과 방향에 따라 다른 효과를 나타낸다고 판단된다. Fig. 9는 각 관내의 수직선상 속도분포를 나타낸다. 상대적으로 곡관이 작아 곡관의 효과는 거의 보이지 않으나 곡관의 출구 쪽에서 직관유동의 효과에 의해 바깥방향으로 속도 피크가 치우쳐지는 것을 확인할 수 있다. 또한 bypass를 지나 유동이 빠르게 발달함을 확인할 수 있으며, 이는 합쳐지는 지점에서의 수직성분에 의한 빠른 운동량전달이 원인이라 판단된다.



(a) $Q=2\mu\text{l}/\text{min}$



(b) $Q=10\mu\text{l}/\text{min}$



(c) $Q=20\mu\text{l}/\text{min}$

Fig. 8 Vector fields at position 3; $h=0\mu\text{m}$

4. 입자부착이 없을 경우의 Micro-Bypass의 유동 경향

Fig. 10 은 내부 유체의 점성을 바꾸어 실험한 결과이며 실제 본 microfluidics 에서 응용될 유체와 동일한 유체이다. 입자의 부착이 이루어 지지 않음을 알 수 있다. 사용된 유체는 알코올수용액 (3% poly vinyl Alcohol aqueous solution)이 사용되었으며, 혼합물이라 정확한 물성치는 알 수 없으나 점성이 이전의 입자부착 시에 사용된 DI-water 의 경우보다 높은 경우이다. 입자의 부착이 이루어 지지 않은 원인으로서는 유체의 높은 점성과 특히 앞서의 분지되는 영역에서의 움푹 패인 곳을 수정하여 제작하였기 때문으로 판단된다.

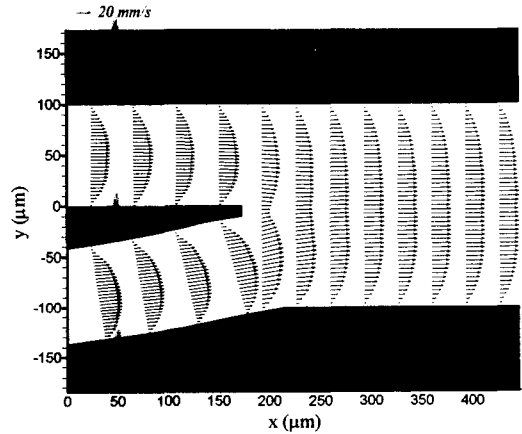


Fig. 9 Position 3; $Q=20\mu\text{l}/\text{min}$; $h=0\mu\text{m}$

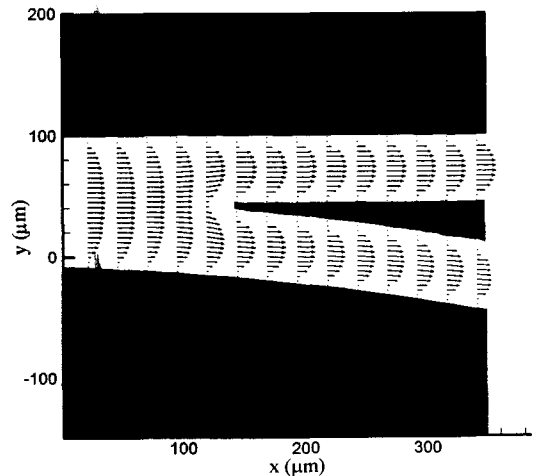


Fig. 10 Vector field without particle sticking at position 1; $h=0$; $Q=2.5\mu\text{l}/\text{min}$

Fig. 11은 분지된 이후의 속도장과 추출된 속도 분포를 나타내고 있다. 앞서의 입자부착이 일어난 경우와는 달리 반대로 유로의 저항에 의해 곡관 내에서의 유속이 직관보다는 느림을 알 수 있으며,

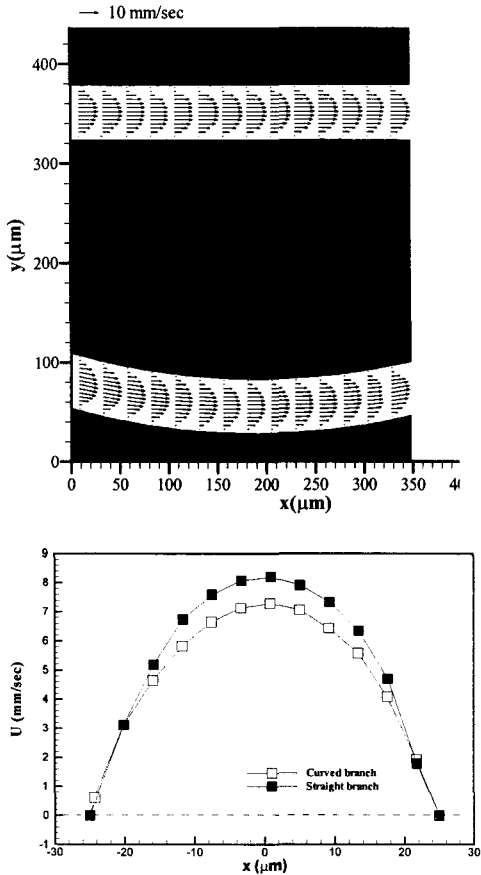


Fig. 11 Velocity profile without particle sticking at position 2; h=0; Q = 2.5 μl/min

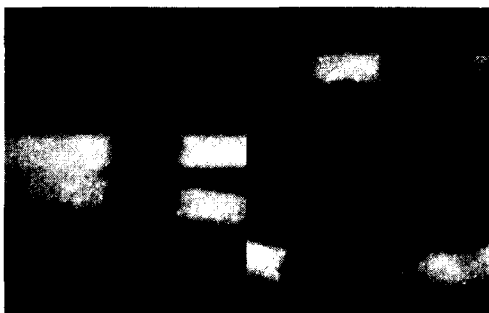


Fig. 12 Application of micro-bypass

이는 채널디자인 시 예상했던 경향이다. 직관이 곡관에 비해 10% 정도 빠름을 확인할 수 있었다. Fig. 12는 본 연구를 통해 획득한 이러한 속도차를 응용하여 연구되고 있는 micro-droplet의 분리 및 혼합을 위한 연구의 예를 나타낸다.

5. 결론

마이크로 분지관 내부유동에 대한 Micro-PIV 계측이 수행되어졌으며, 입자의 부착에 따른 유동의 변화를 살펴볼 수 있었다. PIV 계측기법의 기본인 입자가 미세유체 소자에서는 결과의 불확실성을 나올 가능성이 있는 하나의 요인임을 확인할 수 있었으며, 입자를 사용하는 다른 미세유체 소자에서 또한 유사할 것이라 판단된다. 따라서 입자를 사용하는 경우 입자가 붙어 엉기는 현상에 대해 주의해야 함을 알 수 있다. Micro-PIV 계측에 대해서는 어느 정도 높은 공간해상도의 속도분포를 구할 수 있었다. 유체의 점성과 bypass의 끝단을 처리 한 결과 입자의 부착이 일어나지 않음을 확인 하였으며 유체에 따라 다른 특성을 가진다고 판단 된다. 입자의 부착이 이루어지지 않은 경우 유속이 약 10%정도 빠름을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 국가지정연구소(NRL) 사업의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, D., Su, J. M. and Liang, H. Y., 2001, "A Numerical Simulation of Steady Flow Fields in a Bypass Tube," *J. Biomechanics*, Vol. 34, pp. 1407~1416.
- (2) Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. and Adrian, R. J., 1998, "A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics," *Experiments in Fluids*, Vol. 25, No. 4, pp. 316~319.
- (3) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 414~419.
- (4) Sharp, K. V., "Experimental Investigation of Liquid and Particle-Laden Flows in Microtubes," *Ph. D. Thesis in Univ. of Illinois*.
- (5) Olsen, M. G. and Adrian R. J., 2000, "Out-of-Focus Effects on Particle Image Visibility and Correlation in Microscopic Particle Image Velocimetry," *Experiments in Fluids*, Vol. 29/7, pp. 166~174.