

마이크로 채널 내부 유동의 Micro-PIV 측정과 제반 문제점 (Micro-PIV Measurements of Microchannel Flows and Related Problems)

이 상 준 • 김 국 배(포항공과대학교 기계공학과)
Sang-Joon Lee, Guk-bae Kim (POSTECH, Dept. of Mechanical Eng.)

Key Words : Micro-PIV(마이크로 입자영상유속계), Micro-channel(마이크로 채널), Particles(입자), Microscope(마이크로스코프)

Abstract

Most microfluidic devices such as heat sinks for cooling micro-chips, DNA chip, Lab-On-Chip, and micro pumps etc. have microchannels of various size. Therefore, the design of practical microfluidics demands detail information on flow structure inside the microchannels. However, detail velocity field measurements are rare and difficult to carry out. In addition, as the microfluidics expands, accurate understanding of microscale transport phenomena becomes very important.

In this research, micro-PIV system was employed to measure the velocity fields of flow inside a micro-channel. We carried out PIV measurements for several microchannels with varying channels width, inlet and outlet shape, filters, CCD camera and ICCD camera, etc. For effective composition of micro-PIV system, first of all, it is essential to understand optics related with micro-imaging of particles and the particle dynamics encountered in micro-scale channel flows. In addition, it is necessary to find the optimal condition for given experimental environment and micro-scale flow to be investigated. The problems encountered in measuring velocity field of micro-channel flows are discussed in this paper.

1. 서 론

최근 BT, NT에 관한 관심이 높아짐에 따라 Bio-MEMS에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. Bio-MEMS는 미세 가공기술(MEMS : Micro-Electro-Mechanical System)을 생명공학(bio-technology)에 응용하는 기술로써, 생체분자(효소, 핵산, 단백질, DNA 등)의 작용 mechanism과 혈관 내부유동의 해석 및 제어, DNA chip, 세포의 점착력 해석 등을 다루고 있다. 실제 micro-pump, micro-mixer, micro heat exchanger 등과 같은 다양한 제품의 개발이 가능하게 되었으며, 이와 관련한 microfluidics 분야 역시 새로운 연구분야로 떠오르고 있다. 이와 같은 Bio-MEMS나

microfluidics분야에서 마이크로 구조물 내부를 흐르는 유체에 대한 유동정보는 구조물 설계 시 이용할 수 있고, 미세 크기의 구조물에서 발생하는 문제점들의 해결에도 활용할 수 있다. 따라서 마이크로 구조물 내부의 유동을 모사할 수 있는 micro-channel 내부 유동에 대한 정확한 해석은 Bio-MEMS나 microfluidics 분야 연구에 많은 기여를 할 수 있다.

본 연구에서는 micro-PIV 시스템을 구성하여 수백 마이크로미터 너비의 채널 내부 유동을 측정하였다. 그리고 micro-PIV 속도장 측정과정에서 발생하는 여러 가지 문제점들과 이들의 해결 방법들을 고찰해 보았다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 마이크로 채널

Fig 1 (a)은 본 연구에 사용되어진 마이크로 채널로 높이가 $50\mu\text{m}$, 폭이 $W=50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $400\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$ 인 멀티형 채널이고, 실리콘 wafer에 SU-8을 deposition 하였다. 그리고 채널을 유리로 덮고, syringe pump와 연결할 수 있게 jig를 제작하였다.

2.2 펌프 및 particles

마이크로 채널 내부로 유체를 유입 시키기 위하여 syringe pump를 사용하였다. 용량이 60ml인 syringe를 사용하였으며, 유량 범위는 $0.2\text{ml/hr} \sim 426\text{ml/hr}$ 이었다.

작동유체로는 증류수를 사용하였으며, 직경이 $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $0.8\mu\text{m}$ 인 폴리머 microspheres (Duke Scientific Co., red fluorescence)를 추적 입자로 사용하였다. 이 입자들은 542nm 파장의 빛에서 excitation하고, 612nm 파장의 빛을 emission한다. 따라서 본 실험에서는 Nd:YAG laser를 광원으로 사용하였으며 filter를 사용하여 파장이 612nm 인 particle영상을 획득하였다. 입자 농도는 물 10ml 당 형광염료를 약 $30\mu\text{l}$ 정도 주입하였다.

2.3 마이크로 PIV 시스템

본 연구에 사용되어진 마이크로 PIV 측정 시스템에 대한 개략도를 Fig.2에 나타내었다. 마이크로 PIV 시스템은 크게 Nd:YAG 레이저, Kodak 2K*2K CCD 카메라, delay generator, microscope, optics, IBM PC등으로 구성되어 있다. 2-head Nd:YAG 레이저는 각 레이저 헤드의 repetition rate가 20Hz이며, 각 펄스 당 최대 출력 에너지는 약 25mJ 이상, 약 6nsec 의 짧은 pulse width를 가진다. Kodak 2Kx2K CCD camera는 2048x2048 pixels의 고해상도를 가짐으로써 일반 CCD 카메라에 비해 보다 깨끗한 입자 영상의 취득이 가능하다. Nd:YAG 레이저와 CCD 카메라의 동기를 위하여 delay generator를 사용하였다. 영상 확대를 위해 long distance microscope를 사용하였다. 이 microscope는 초점거리

(working distance)가 $15\text{cm} \sim 30\text{cm}$ 로 측정하고자 하는 물체와 렌즈 사이의 거리가 멀기 때문에, 일반 microscope보다 영상의 왜곡을 크게 감소시킬 수 있다.

2.4 실험방법

마이크로 채널의 inlet shape에 따른 채널 내부의 유동특성을 파악하기 위하여 rectangular type과 round type의 입·출구 형상을 갖는 두 종류의 마이크로 채널에 대하여 PIV속도장 측정을 수행하였다. 폭이 $W=400\mu\text{m}$, $800\mu\text{m}$ 인 마이크로 채널의 입구 영역에 대하여 유량을 $Q=5\text{ml/hr}$, 10ml/hr 로 변화시켜가며 실험하였다. 또한, 채널 하류방향으로 $X=3/4L$ 인 위치에서 채널 내부의 속도장을 측정하였다.

채널 입구 영역에서의 in-line 속도성분 공간분포 변화를 살펴보기 위하여 폭이 $W=100\mu\text{m}$ 인 마이크로 채널에 대하여 구한 순간속도장 결과들을 앙상블 평균하여 평균 속도장 결과를 구하였다. 이 때 작동유체의 유량은 $Q=500\mu\text{l/hr}$ 로 고정하고 실험을 수행하였다. Seeding particle로는 500nm 직경의 polymer microspheres (red fluorescing)를 사용하였고, 각각의 실험조건에 대해 100장의 입자영상을 취득하여 이로부터 50장의 순간 속도장을 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과

채널 폭이 $100\mu\text{m}$ 에서 $800\mu\text{m}$ 까지의 몇 가지 마이크로 채널에 대해 입자영상을 획득하였으며, 각각의 순간 속도장 및 여러 정량적인 유동정보를 획득하였다. 채널의 입구 형상이 직각인 경우, 입구 모서리로부터 유동박리가 발생하여 일종의 유체저항으로 작용하였으며, 채널 벽면을 따라 박리기포가 존재하였다. 그러나, round type의 입구 형상의 경우, 채널 내부로 유체가 원활히 유입되어 채널 내부에서 유동이 상대적으로 빨리 발전하였다. 채널 입구에서 속도분포는 하류로 나아가감에 따라 점진적으로 발달하며, $x=3/4L$ 하류 위치에서는 거의 fully developed된 유동특성

을 보여주었다.

3.2 Micro-PIV 시스템의 제반 문제들

3.2.1 마이크로 채널

본 연구에서 제작한 마이크로 채널은 하나의 입구 reservoir에서 폭이 서로 다른 여러 채널로 갈라지는 멀티형 채널이기 때문에, 실리콘 펌프에서 일정 유량을 주입하더라도 실제 측정 채널에서의 주입유량을 알 수가 없었다. 그리고 wafer에 su-8로 채널모양의 패턴을 만든 후 그 위를 유리로 덮어 sealing을 하였기 때문에, sealing 완벽하게 되지않아 채널 상부와 채널을 덮고 있는 glass window 사이로 소량의 leakage가 발생하였다. 위와 같은 문제들은 PDMS로 만든 단일 채널을 제작함으로써 해결할 수 있다. PDMS 채널의 제작 과정은 Fig. 3과 같다. (c)단계까지는 일반적인 마이크로 채널의 제작과정과 유사하다.

그 이후 과정은, (d) 만들어진 master위에 PDMS를 붙는다. (e) PDMS를 굳힌 뒤, PDMS를 분리해 낸다. (f) 떼낸 PDMS를 평평한 PDMS 혹은 glass위에 붙인다. 대략 이런 과정을 거쳐 만들어진 PDMS 채널은 leakage문제를 완전히 해결할 수 있다. 이 방식은 실제 bio chip을 제작하는 데도 그대로 사용된다.

채널 패턴을 su-8을 사용하여 만들게 되면, 또 다른 문제점이 발생한다. 유동가시화나 마이크로 채널에 적용할 측정기법을 개발하는 목적으로는 굳이 직사각형 단면을 가진 채널을 만들지 않아도 무방할 것이다. 그러나, 기존 이론결과나 수치해석 결과와 비교하기 위해 많은 경우 직사각형 단면의 마이크로 채널이 요구되어진다. su-8을 자외선(UV light)으로 노광하여 su-8을 developing하는 공정으로는 채널의 단면을 직각사각형으로 만들 수가 없다. 만들어진 채널의 형상을 살펴보면(Fig. 4), 채널의 밑면과 옆면의 각도가 90°가 아니고 77.3°정도임을 알 수 있다. 따라서 su-8을 노광 및 developing 하는 과정에서 채널의 단면 형상은 사다리꼴형상을 가지게 되는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 LIGA공정을 사용하여 (c)단계까지의 공정을 수행하면 된다. LIGA공정을 사용하며 su-8대신 PMMA을 developing하여 채널

형상을 만들게 되면, 기존의 su-8을 사용하였을 때보다 aspect ratio가 훨씬 큰 마이크로 채널을 만들 수 있을 뿐 아니라, 채널 단면 형상도 직사각형으로 만들 수 있다.

이 밖에 채널을 구성하는 재료의 roughness도 유동에 영향을 주게 된다. 특히 수십 μm 크기의 상대적으로 작은 마이크로 채널에서는 surface phenomenon이 매우 강하기 때문에, 채널의 벽면의 성상이 상당히 중요한 역할을 한다. 또한 마이크로 채널을 제작하는 과정(MEMS공정)에 있어 채널의 shape 및 특성은 제작 환경에 크게 영향을 받기 때문에, 채널 벽면의 roughness 역시 제작과정에서의 여러 환경조건에 따라 많은 차이를 보이게 된다. 따라서 microfluidics 해석함에 있어 채널 벽면의 roughness를 고려할 필요성이 있다.

3.2.2 Particles

본 연구에서는 여러 가지 다른 크기의 입자를 사용하였지만 본 연구에 사용한 영상 시스템으로는 300nm 크기의 입자는 영상이 잘 잡히지 않았으며, 500nm 크기의 입자가 영상 취득에 가장 적당하였다.

Fig. 5는 너비가 400 μm 인 채널의 입구 영상을 획득한 것이다. 이 영상을 살펴보면, 벽면에 달라붙은 tracer 입자들에 기인한 산란현상과 nano입자들의 응집성에 의해 일부 영역에서 입자들이 덩어리지는 현상을 볼 수가 있다. 채널 폭이 100 μm 인 채널의 입구 영상을 보여주고 있는 Fig. 6을 보면 레이저광에 의해 벽면 근처에서 강한 산란이 발생하며 채널 외부, 즉 채널 상부와 채널을 덮고 있는 glass window 사이에 입자들이 존재하고 있음을 관찰할 수 있다. 그리고, 영상을 확대하였기 때문에 반사에 의한 산란이 보다 강하게 나타난 것을 알 수 있다. 연속된 영상을 보게 되면 입자 몇몇은 전체 유동과는 전혀 다르게 움직이는 것을 볼 수 있는데, 이는 Brownian 운동의 영향처럼 추정되어진다.

이처럼 작은 입자를 tracer로 사용하게 되면, 입자끼리의 응집성, 입자들의 벽면에의 협착, 입자가 미세유동에 미치는 영향, 여러 가지 입자와 입자사이의 상호작용에 기인한 영향 등과 같은 많은 문제가 발생한다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 미소 크기의 채널 내부에서의 입자들의 거동에 관하여 입자역학 (particle dynamics)관점에서 자

세히 연구하여야 할 것이다.

3.2.3 Microscope와 filter

본 연구에서는 microscope로 long-distance lens를 사용하였다. 이 렌즈는 초점 거리가 일반 현미경렌즈와는 달리 매우 길다. 따라서 실험장치를 구성하는데 많은 이점이 있으며, 마이크로 채널이 아닌 공동 내부에서 발생하는 여러 가지 미세유동도 관찰할 수도 있다. 하지만 이러한 특성은 본 연구에 있어서는 단점으로 작용하였다.

본 연구에서는 입자 영상을 입자에서 형광되어진 빛을 획득하여 얻는데, 이 때 excitation하는 레이저광의 세기를 높이더라도 입자에서 emission하는 광량은 어느 정도에서 saturation하게 된다. 따라서 초점거리가 길어지면 획득할 수 있는 빛의 양이 현미경 렌즈를 사용하는 것보다 크게 적어지게 되어, 입자의 크기가 작아질수록 입자영상을 획득하기가 어려워 300nm 크기의 입자영상은 제대로 잡을 수 없었다. 반면, 현미경 렌즈를 사용하는 것에 비해 long distance lens를 사용하게 되면 영상의 굴절을 훨씬 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 따라서 연구하고자 하는 유동의 특성과 실험장치에 따라 알맞은 렌즈를 선택하는 것이 중요하다.

이와 더불어 형광된 빛을 효율적으로 얻기 위해서는 filter의 선택도 매우 중요하다. 본 연구에서 형광 입자로부터 형광된 빛을 얻고자 하는 이유는 레이저광에 의해 채널의 벽면에서 산란되는 빛을 제거하기 위함이다. 실제 low pass filter를 사용하여 형광된 빛만을 얻는 것은 쉽지가 않다. 따라서 입자의 excitation band와 emission band의 특성을 충분히 이해하고 emission될 때 saturation되는 광량을 고려하여 입자 영상만을 얻을 수 있는 가장 적절한 filter를 사용해야 될 것이다.

3.2.4 CCD camera

본 연구에서는 2K*2K CCD camera와 1K*1K Intensified CCD(ICCD) camera를 사용하였다. 앞에서 언급했듯이 nano meter scaled의 미세한 입자들로부터 나온 형광된 빛의 광량은 매우 적기 때문에, 깨끗한 입자

영상을 획득하기 위해서는 ICCD 혹은 cooled CCD가 필요하게 된다. 또 다른 방법으로 보다 출력이 강한 레이저를 사용하여 이 문제를 해결할 수는 있으나 경제적이지 못한 측면이 있다. 또한 공간해상도의 경우 microfluidics를 연구하기 위한 목적이라면 1K*1K정도면 충분할 것이라 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 micro-PIV/PTV 시스템을 구축하였으며, 채널의 종류, 채널의 너비, 입자의 크기, 여러 가지 filters, 일반 CCD 및 ICCD camera, 실험장치의 다양한 구성 등의 많은 시도를 통해 효과적인 micro-PIV/PTV 시스템을 구성하고자 하였다. 효과적인 micro PIV system을 구성하기 위해서는 우선 tracer 입자들의 특성과 filter 등의 광학에 관한 이해가 필수적이며, 마이크로 및 나노 연구에서 발생하는 입자 거동에 관한 고찰도 필요하다. 또한, micro-fluidics 분야를 연구함에 있어서 미소 유체에서 발생하는 여러 가지 이론적인 현상을 관찰하고 해석하는 것도 중요하지만, LOC(Lab On a Chip), DNA chip과 같은 응용분야에서 문제시 되는 여러 가지 현상들을 찾아 그 현상을 해석할 수 있는 model을 구성하고 해석하는 것도 또한 중요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] A. Eringen [1964] Simple microfluids, Int. J. Eng. Sci.,2, pp. 205-217.
- [2] C. D. Meinhart, S. T. Wereley, J. G. Santiago [1999] PIV measurements of a microchannel flow, *Experiments in Fluids*, Vol. 27, pp. 414-419.
- [3] D. Tretheway, C. Meinhart [2001] Micron-resolution PIV near a hydrophobic microchannel wall, *4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, Germany*, PIV'01 Paper 1171.
- [4] J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart,

D. J. Beebe, R. J. Adrian. [1998] A particle image velocimetry system for microfluidics, *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 316-319.

- [5] D. J. Shaw [1980] Introduction to colloid and surface chemistry, 3rd edn. London: Butterworths.
- [6] S. J. Baek, S. J. Lee [1996] A new two-frame particle tracking algorithm using match probability. *Experiments in Fluids*, Vol. 22, pp. 23-32.
- [7] 김형범, 이상준 [2000] 적응형 하이브리드 기법을 이용한 2-Frame PTV기법의 성능향상 연구, 대한기계학회논문집 A권, 제24권 제3호, pp. 443-449.
- [8] L. Ren, W. Qu, D. Li [2001] Interfacial electrokinetic effects on liquid flow in microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 3125-3134.

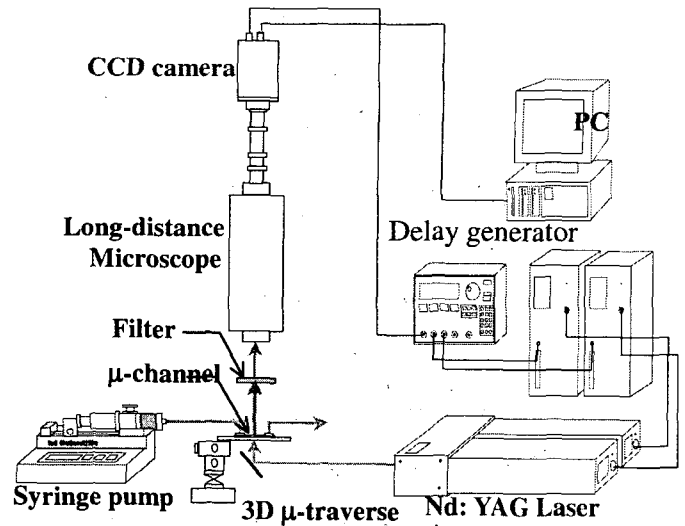


Fig. 2 Schematic diagram of Experimental setup

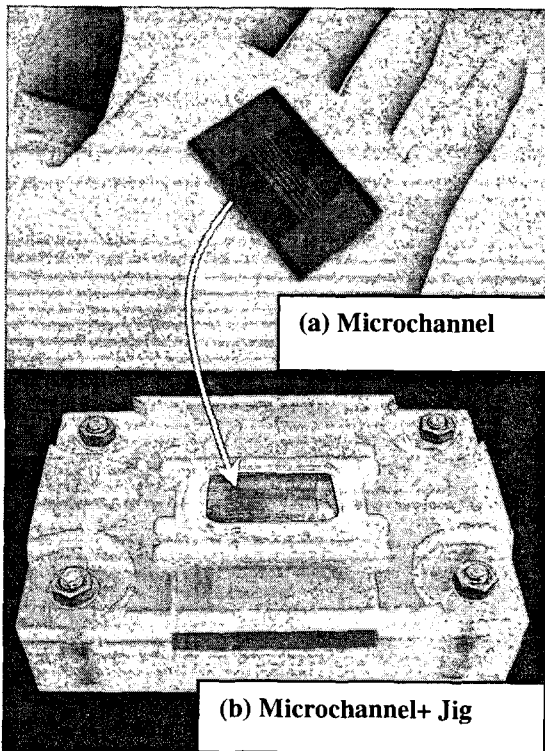


Fig. 1 Photograph of microchannels
(H=50μm, W= 50, 100, 200, 400, 800μm)

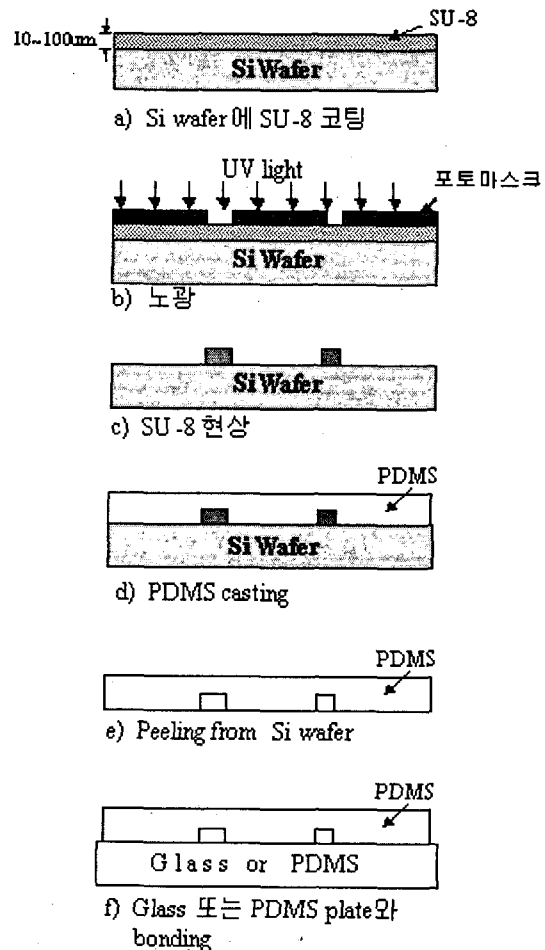


Fig. 3 fabrication process of PDMS micro-channel

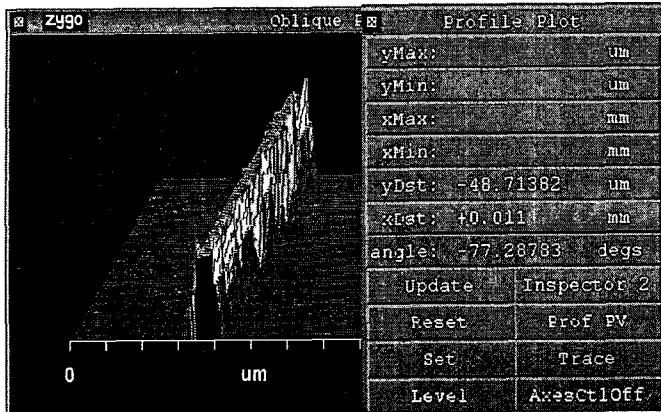


Fig. 4 Shape of microchannel made of SU-8

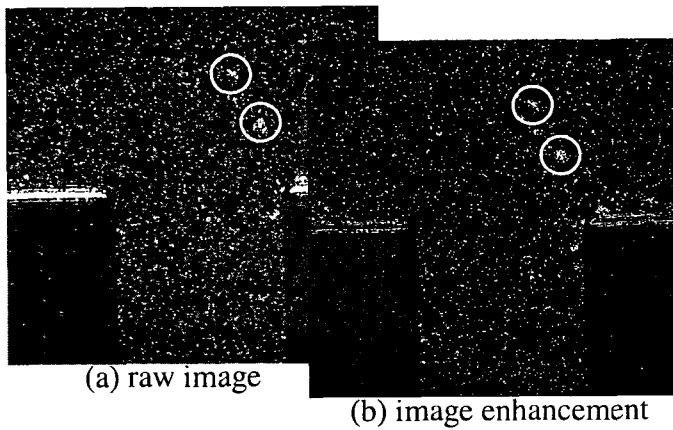


Fig. 5 Particle image at the inlet region of W=400 μ m micro-channel

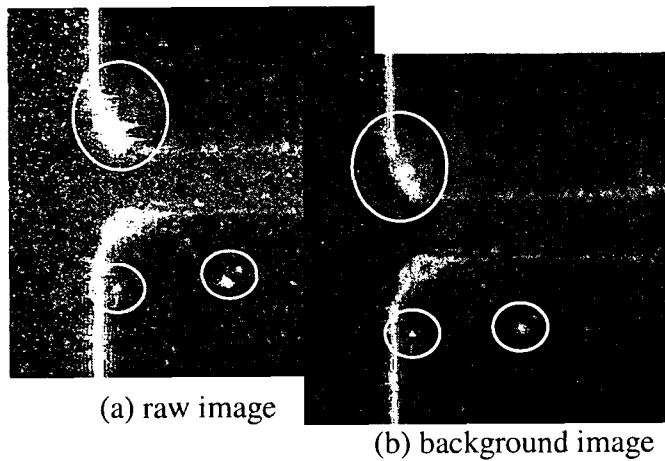


Fig. 6 Particle image at the inlet region of W=100 μ m micro-channel