

마이크로 채널 내부 유동의 Micro-PIV 측정과 제반 문제점

이상준* · 김국배*

Micro-PIV Measurements of Micro-channel Flows and Encountered Problems

Sang-Joon Lee* · Guk-Bae Kim*

1. 서 론

최근 BT(Bio Technology), NT(Nano Technology)에 관한 관심이 높아짐에 따라 bio-MEMS에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. Bio-MEMS는 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 가공기술을 생명공학분야에 응용하는 첨단 기술로써, 생체분자의 작용 메커니즘과 혈관 내부유동의 해석 및 제어, DNA 칩, 세포의 점착력 해석 등을 다루고 있다. 실제 마이크로 펌프, micro-mixer, 미세 열교환기 등과 같은 다양한 응용제품의 개발이 이루어졌으며, 이와 관련한 microfluidics는 새로운 연구분야로 떠오르고 있다. 이와 같은 bio-MEMS나 microfluidics분야에서 미세 구조물 내부를 흐르는 유체유동에 대한 정보는 미세 구조물의 설계나 여기서 발생하는 문제점 해결에 활용할 수 있다. 따라서 미세 구조물 내부 유동을 간단하게 모사할 수 있는 마이크로 채널 내부 유동에 대한 정확한 해석은 이들 분야 연구에 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

본 연구실에서는 지난 수년간 다양한 방법으로 micro-PIV 시스템을 구성하고 자체 제작한 수백 마이크로미터 크기의 마이크로 채널 내부 유동의 속도장을 측정해 오고 있다. 그 동안 micro-PIV 시스템을 구축하고, 마이크로 채널을 제작하는 과정에서 발생했던 여러 가지 문제점들과 이들을 해결하기 위한 고찰들에 대해 소개하고자 한다.

2. 마이크로 채널

본 연구실에서 초기에 사용한 마이크로 채널은 실

리콘 웨이퍼(wafer) 위에 SU-8 재질을 쌓아올린 멀티 채널 형태로 제작되었는데, 제작과정은 다음과 같다. Fig. 1(a)처럼 우선 Si 웨이퍼 위에 SU-8 photoresist (PR)를 코팅한 후, (b) 채널 모양이 디자인된 에멀전(emulsion) 마스크를 덮고 자외선(UV, ultra violet) 노광을 한다. (c) SU-8은 negative PR이기 때문에 현상(development)하고 나면 자외선에 노광된 부분만 남게 된다. Fig. 2(a)는 이와 같은 과정을 거쳐 제작한 멀티형 마이크로 채널을 찍은 사진이다. Fig. 2(b)는 채널 상부를 유리로 덮어 밀봉(sealing)한 후 jig를 제작하여 syringe 펌프와 연결되도록 만든 것이다. 그런데, 채널의 윗부분을 glass bonding 하지 않고 jig를 사용하여 가압방식으로 밀봉하였기 때문에 채널 상부와 유리 사이로 소량의 누설이 발생하였다. Fig. 3(b)에 표시한

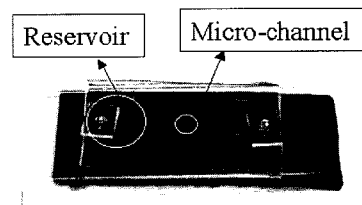
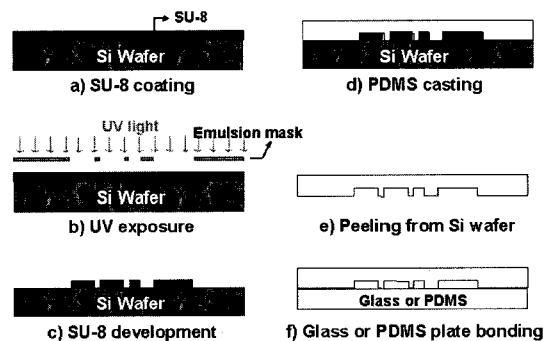


Fig. 1. Fabrication process of PDMS microchannel.

*포항공대 기계공학과(POSTECH)

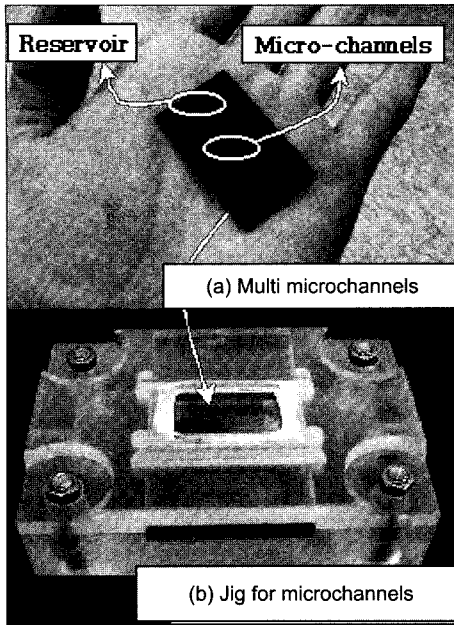


Fig. 2. Photograph of SU-8 microchannel and its jig.

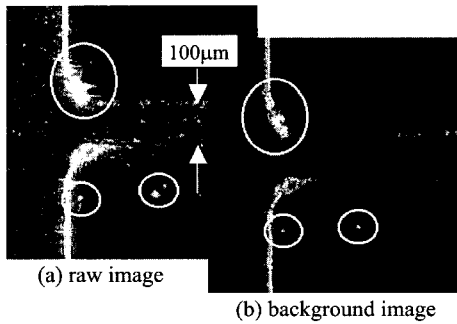


Fig. 3. Typical scattering particles image.

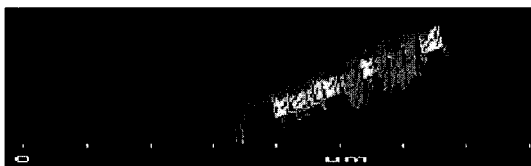


Fig. 4. Microchannel made by SU-8 MEMS fabrication.

두개의 작은 원은 누설되어진 입자영상을 나타낸 것이다.

이와 같은 채널의 누설 문제는 PDMS(poly-dimethylsiloxane)로 만든 마이크로 채널을 사용함으로써 해결할 수 있었다. PDMS 마이크로 채널의 제작과정은 다음과 같다. 이미 설명한 Fig. 1(c)과정까지 만들어진 것

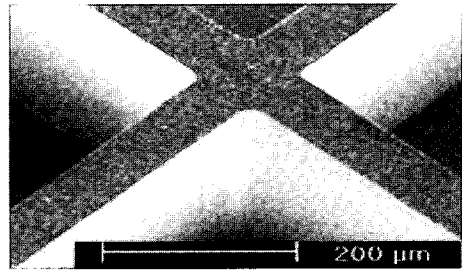


Fig. 5. Micro-structure made by LIGA process.

을 master라 한다. 다음 단계(d)는 만들어진 master위에 PDMS를 붓고, (e) PDMS를 굳힌 뒤, PDMS를 master로부터 분리해 낸다. (f) 분리해낸 PDMS를 평평한 PDMS 판 혹은 유리기판 위에 플라즈마로 붙이면 PDMS 마이크로 채널이 완성된다. 실제 DNA칩이나 LOC(Lab-on-a-chip)과 같은 bio-chip 제작시 유사한 방법이 사용되고 있다.

일단 만들어진 master를 이용하여 molding 방식으로 여러 개의 마이크로 채널을 반복적으로 쉽게 만들 수 있다. 또한 LIGA나 레이저 가공 등 다른 공정을 사용하여 다양한 형태의 마이크로 채널 master 제작이 가능하다. 하지만 PDMS는 제작 당시에는 친수성 특성을 지니지만 시간이 지남에 따라 소수성(hydrophobic)특성이 강해지므로 전기장을 이용한 EOF(Electro-osmosis flow) 실험의 경우, 표면에 작용하는 전기적 특성이 시간과 실험조건에 따라 변화하므로 주의해야 한다.

마이크로 채널을 제작함에 있어서 고려해야 되는 것 들로는 다음과 같다. Micro-fluidics와 관련된 유동 현상들은 대부분 스케일이 매우 작으므로, 채널 및 구조물 형상의 영향을 크게 받는다. 또한, 똑같은 설계 디자인이라 하더라도 제작과정에 어떠한 공정을 거쳤는가에 따라 미세 형상 및 표면상태가 달라지기 때문에 연구목적에 맞는 적절한 제작 공정을 선택하는 것이 중요하다. 본 연구실에서는 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8 PR로 master를 제작한 후, micro-molding 기법을 이용하여 만든 PDMS 마이크로 채널을 사용하고 있다.

SU-8 재질을 자외선으로 노광하고 현상하여 master를 제작하는 MEMS공정으로는 채널의 횡단면을 정확히 직사각형(바닥과 벽면이 수직)으로 제작하기가 어렵다. Fig. 4는 MEMS 공정으로 만든 마이크로 채널 형상을 3차원으로 나타난 것인데, 채널의 밑면과 옆면사이의 각도가 약 77.3° 정도임을 알 수 있다.

만약 연구 목적이 LOC와 같은 미세 유동에 관한

응용이나 마이크로 채널에 적용할 가시화 측정기법 개발이라면 SU-8 master를 사용하더라도 무방하다. 그러나, 마이크로 채널 내부 미세유동 현상에 대한 정량적 데이터를 얻거나 수치해석 결과와 비교하기 위해서는 채널의 단면 형상도 반드시 고려해야 할 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 연구실에서는 LIGA 공정기술을 이용하여 마이크로 채널을 제작하고 있는데, SU-8대신 PMMA(polymethylmethacrylate)를 사용하여 master를 제작한 후 전과 동일한 공정을 거쳐 PDMS 마이크로 채널을 만들게 된다. LIGA 공정을 사용하게 되면 Fig. 5에 나타난 것처럼 정확하게 수직 형상의 구조물을 만들 수 있으며, 종횡비(aspect ratio)가 훨씬 큰, 즉, 채널의 깊이가 깊은 마이크로 채널을 제작할 수 있다.

이 밖에 master를 제작하는 방법으로는 RIE(reactive ion etching), 레이저 가공, 초음파 가공 등이 있으며, 공정에 따라 채널 형상은 조금씩 달라진다. 앞서 언급한 바와 같이 master를 완성한 후에는 PDMS로 채널을 찍어내는(molding) 방법을 사용하여 똑같은 PDMS 채널을 여러 개 만들 수 있다. 따라서 연구 목적에 적합한 공정이 있다면, 다소 어려움이 따르더라도 그 공정을 선택하여 master를 제작하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

이 밖에 마이크로 채널의 표면 성상도 채널 내부 유동에 다소 영향을 주게 된다. 특히 채널의 크기가 작아질수록 표면장력과 같은 표면력(surface force)에 의한 영향을 많이 받기 때문에, 채널 벽면의 물리 화학적 상태는 채널 내부 유동에 크게 영향을 주게 된다. 또한 마이크로 채널을 제작하는 과정에 있어서 제작 환경(계절, 기후, 온도, 습도 등)도 채널의 미세 형상 및 특성에 영향을 주게 되며, 이로 인해 마이크로 채널 제작에 오차가 발생하게 된다. 따라서 마이크로 채널의 제작 공정에 기인한 오차에 대한 인식도 필요하다. 그러므로, microfluidics와 관련한 유동계측에 있어서 error analysis와 함께 이러한 오차를 줄여나가기 위해 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

3. Micro-PIV 시스템

본 연구실에서 처음 구축한 micro-PIV 시스템은 Fig. 6과 같이 Kodak 2 K×2 K CCD 카메라와 long distance 마이크로스코프로 구성되었으며, 직경 830 nm 크기의 입자를 이용하여 산란(scattering) 입자영상을

획득하였다. 여기서 산란이라 함은 Mie-scattering을 의미하며, 입사광선(주로 레이저)의 파장과 같은 파장대의 산란된 입자영상을 의미한다. 이는 일반적인 macro PIV 시스템에서의 입자 영상과 동일한 것이다. 그런데, micro-PIV의 경우에는 입자영상을 획득함에 있어서 주위 구조물에 의한 난반사가 매우 심하기 때문에 형광된 입자영상을 사용하는 것이 바람직하다. 예를 들어, Nd:YAG 레이저를 사용한다면 532 nm 파장대에서 여기(excitation)되고 대략 600 nm 이상에서 방출(emission)되는 형광입자를 사용하게 된다. 이 때 CCD 카메라 전방에 대략 560 nm 정도의 고대역 필터(long-pass filter)를 설치하면, 채널 벽면 등으로부터 난반사되는 빛(532 nm)을 제거할 수 있기 때문에 보다 깨끗한 입자영상을 얻을 수 있다.

본 연구실에서 사용하고 있는 long-distance 마이크로스코프는 초점거리가 10~25 cm 정도로 초점거리가 1 cm 이내인 일반 현미경 렌즈보다 훨씬 길다. 따라서 실험모델 구성에 많은 공간적 여유가 있으며, 구조물 주위에서 발생하는 미세유동이나 external 유동 연구에도 사용 가능하다.

Fig. 6은 초기에 구축한 micro-PIV 시스템의 구성도를 나타낸 것인데, 이 시스템으로 획득한 산란 입자영상은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 채널 벽에 의한 난반사가 심해 벽면 근처에서 깨끗한 입자영상을 얻기 힘들었다. Fig. 3(b)는 여러 장의 영상을 이미지 처리를 하여 구한 배경(background)영상을 나타낸 것인데 입자 외에도 많은 노이즈가 존재하고 있다.

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 형광 입자 영상을 사용하는 micro-PIV 시스템을 구성하였다. 입자의 형광 영상을 얻기 위해서 직경 약 0.3 μm , 0.5 μm , 0.8 μm , 3 μm 인 붉은색 형광 폴리머 구형입자(Duke

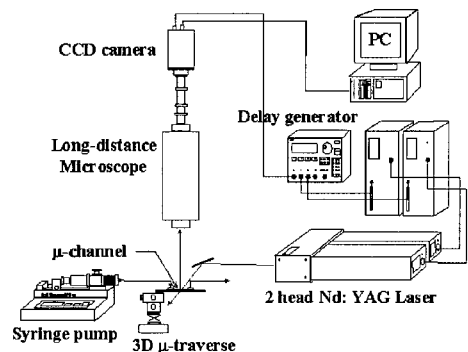


Fig. 6. Schematic diagram of Micro-PIV system

Scientific)를 사용하였다. 이 입자들은 542 nm파장의 빛에 여기하고, 612 nm파장에서 형광 빛을 방출한다. 여기서 이야기하는 파장은 여기 혹은 방출 특성을 나타내는 파장 곡선의 peak값을 의미하며, 형광 입자 및 필터를 선택함에 있어서는 peak값 뿐만 아니라 해당하는 광학특성이 어느 파장까지 분포해 있는지에 대해 이해하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저(532 nm)를 광원으로 사용하였으며, 몇 가지 고대역(high pass) 필터 및 dichroic 미러를 사용하여 입자의 형광 영상을 획득하였다. 또한 미세입자로부터 형광된 빛의 광량은 산란광에 비해 상대적으로 약하기 때문에, 깨끗한 입자영상을 획득하기 위해서는 Intensified CCD(ICCD) 혹은 cooled CCD가 필요하다. 본 실험에서는 해상도가 1280×1024 pixels인 12 bit ICCD 카메라를 사용하여 입자영상을 획득하였다. 공간해상도의 경우 종류 미세유동을 연구하기 위해서는 1 K×1 K 정도면 충분한 것으로 생각되어진다.

Fig. 7는 입자의 형광영상을 얻기 위한 몇 가지 micro-PIV 시스템 구성도를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 마이크로스코프와 채널 사이에 dichroic 미러를 설치하여, 옆에서 입사하는 532 nm파장의 Nd:YAG 레이저 빔을 90° 꺾어 채널 내부 유동에 조사하고, 532 nm파장에 의해 형광된 612 nm파장의 입자영상을 CCD 카메라 방향으로 통과하도록 하였다. 이 때 마이크로스코프 전방에 emission 필터(570 nm)를 설치하여 레이저에 의해 난반사되는 532 nm파장의 산란광을 필터링하고 형광된 입자 영상만이 마이크로스코프로 들어가도록 하였다. 이러한 실험 구성은 추적입자를 여기하는 Nd:YAG 레이저 빔을 object (마이크로 채널)에 수직으로 입사하게 하는 장점이 있다. Dichroic 미러를 쓰지않고 여기하는 레이저 빔이 object에 바로(옆으로나 비스듬하게) 입사하게 되면, 빔이 채널 내부 유동에 도달하기 전에 채널을 구성하는 주

위 구조물에 의해 굴절 및 난반사가 발생할 가능성이 많다. 이로 인해 레이저 빔이 마이크로 채널 시험부 내에 고르게 분포되지 않거나 시험부의 특정 부분만을 집중적으로 조명하여 좋은 입자영상을 얻지 못하게 된다. 따라서 dichroic 미러를 사용하여 레이저 빔이 안정적으로 시험부에 도달하게 하는 것이 바람직하다.

Fig. 7(b)는 long distance 마이크로스코프 내부에 장착되어 있는 빔 splitter를 dichroic 미러로 대체한 경우로 optical alignment를 보다 정확하고 효과적으로 할 수 있다. 또한 레이저 빔이 마이크로스코프 내부에서 object을 향해 focusing되면서 직접적으로 입자를 형광 시키기 때문에 시험부에 레이저 빔이 정확하게 도달할 뿐 아니라 입자의 형광을 효과적으로 유도할 수 있다. 이 경우에는 emission 필터를 ICCD 카메라 전방에 설치하여 형광된 입자영상으로 얻도록 하였다. 그러나 splitter를 거쳐 레이저 빔을 시험부로 입사했을 때, 레이저 빔은 제대로 focusing되었으나 빔splitter에 의한 난반사가 심해 emission 필터를 사용했음에도 불구하고 원하는 정도의 깨끗한 입자영상을 얻을 수 없었다. 실제 필터를 사용하더라도 filtering시키려는 빛의 세기가 너무 강하게 되면 충분히 필터링되지 않는데, 이는 필터 제품의 품질과도 상관이 있다.

Fig. 7(c)은 레이저 빔을 채널의 아래쪽에서 위로 꺾어 올려 시험부를 직접 조명하는 방법이다. 레이저 빔이 카메라로 바로 들어가지 않도록 약간 비스듬하게 광학장치를 구성하였다. 그리고 렌즈 앞에 emission 필터를 설치하여 입자의 형광영상을 획득하였다. 마이크로 채널의 구조상 레이저 빔이 아래방향에서 들어가게 되면 레이저 빔을 방해할 만한 구조물이 없기 때문에, 주위 구조물에 기인한 굴절이나 반사를 피할 수 있다. 또한 dichroic 미러를 사용하는 Fig. 7(a)의 경우보다 선명한 입자영상을 얻을 수 있었다. Dichroic 미러를 사용할 경우에는, 정확한 optical alignment가 쉽지 않을 뿐 아니라

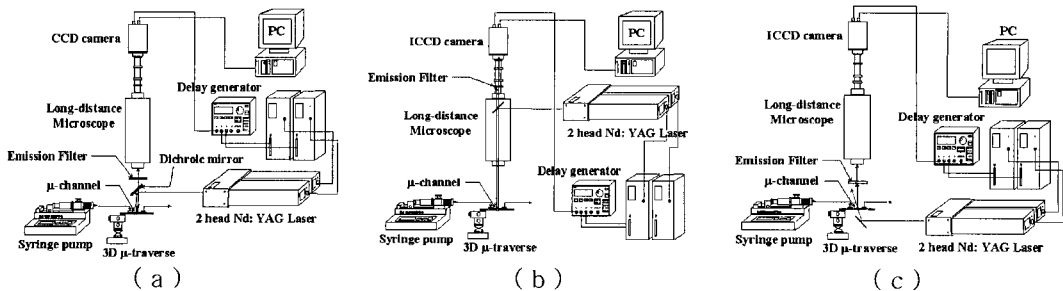


Fig. 7. Various Micro-PIV system configuration.

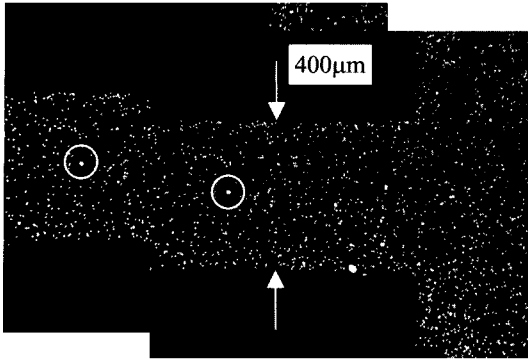


Fig. 8. Flow image of fluorescent particles.

형광된 빛이 Fig. 7(c)의 경우보다 광학장치를 하나 더 거치기 때문에 형광된 빛의 세기가 다소 감소하는 단점이 있다. 또한 형광된 빛이 다시 dichroic 미러를 통과할 때 dichroic 미러가 45° 각도로 기울어져 있어서 형광된 빛의 일부는 45° 각도로 반사될 수 있다. 이 밖에도 몇 가지 다른 micro-PIV 시스템을 구성하고 예비실험을 통해 입자 영상을 비교한 결과, Fig. 7(c)과 같이 구성한 micro-PIV 시스템이 상대적으로 우수한 입자영상을 제공하였다.

그러나 이러한 micro-PIV 시스템은 본 연구실에서 사용하는 long distance 마이크로스코프 및 마이크로 채널에 대해 최적화된 시스템이기 때문에, 모든 micro-PIV 미세유동 실험에 최적의 입자영상을 얻을 수 있는 범용 시스템이라 생각하기는 어렵다. 실제 일반적으로 형광된 입자영상을 얻기 위해 많이 사용되고 있는 상용 마이크로스코프의 경우 Fig. 7(b)와 같은 dichroic 미러 방식을 많이 사용하고 있다. 이것은 관찰하고자 하는 여러 가지 object들에 대하여 보편적으로 사용하기 편하게 범용으로 제작되었기 때문이다. 최근 2차원 속도장 측정기법으로는 PIV와 PTV (Particle Tracking Velocimetry) 방식이 주로 사용되고 있는데, 마이크로 채널 내부 해석에는 현재 PIV 방식이 많이 사용되고 있다. 그러나 벽면 부근의 유동해석이 중요하거나 입자의 개수가 적은 유동의 경우, PTV 방식의 사용이 증가하고 있는 추세이다.

4. 마이크로스코프 및 입자

본 연구실에서 사용하고 있는 long distance 마이크로스코프는 초점거리가 상당히 길기 때문에, 실험모델을 구성하는데 많은 공간적 여유가 있으며, 풍동이

나 수조 내부에 놓인 물체 주위의 미세유동 연구에도 사용할 수 있다. 또한, long distance 마이크로스코프를 사용하게 되면, 일반 마이크로스코프에서 나타나는 짧은 초점거리에 기인한 영상왜곡(optical aberration) 문제도 최소화할 수 있다.

그러나 초점 거리가 길다는 것은 다른 한편으로 렌즈의 측정 각도가 좁아 sensitivity가 떨어지게 된다. 또한 일정한 광량에 대해 초점거리가 길어질수록 획득할 수 있는 빛 에너지는 줄어들게 된다. 따라서 long distance 마이크로스코프를 사용하게 되면 입자의 크기가 작을 경우 깨끗한 입자영상을 획득하기 어려워지게 된다. Mie 산란 방식에서는 직경 500 nm 크기의 입자영상을 뚜렷하게 잡을 수 있으나, 형광 방식으로는 뚜렷하고 깨끗한 입자영상을 얻기 어렵다.

마이크로 채널 유동에서는 채널의 크기가 작아질수록 입자의 영향이 커지기 때문에, 가능한 수백 나노미터 크기의 작은 입자를 선택하는 것이 바람직하다. 따라서 long distance 마이크로스코프의 경우 수십 마이크로미터 이하의 마이크로 채널유동을 관찰하기엔 적합하지 않을 수도 있다. 이 경우에는 상용 현미경에 사용하는 일반 마이크로스코프가 오히려 바람직하다. 따라서, 관찰하고자 하는 유동의 특성과 실험조건에 따라 적합한 마이크로스코프를 선택하고 적절한 배율로 영상을 취득하는 것이 중요하다. 그리고, 채널 내부 3차원 유동을 해석한다든지 횡단면 내부의 유동을 관찰하고자 한다면 confocal 마이크로스코프를 사용하여야 한다.

수백 나노미터 크기의 미세입자를 tracer로 사용하게 되면, 입자끼리의 응집성, 입자들의 벽면에서의 협착, 미세입자가 유동에 미치는 영향, 여러 가지 입자와 입자사이의 상호작용에 기인한 영향, Brownian 운동 등과 같은 문제들이 발생한다. 이 밖에 electrokinetics 관련 연구를 위해서는 입자의 electro-static charge에 관한 정보도 필요하다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 입자역학 관점에서 마이크로 채널 내부에서의 미세 나노입자들의 거동에 관한 자세한 연구가 요구된다.

5. 결 론

본 연구실에서는 그 동안 다양한 종류의 마이크로 채널, 여러 가지 필터, dichroic 미러 및 CCD 카메라, 다양한 입자 및 micro-PIV 시스템 set-up변화 등을 통해 미

세유동 연구에 효과적인 micro-PIV 시스템을 구성하고자 하였다. 깨끗한 입자영상을 얻기 위해서는 사용 중인 레이저에 가장 적합한 형광입자를 선택하여야 하며, dichroic 미러 및 필터의 선택에는 입자의 여기 및 방출 파장특성에 대한 충분한 이해가 요구된다.

PDMS마이크로 채널의 경우, 채널 벽면이나 PDMS 재질 자체로부터 난반사가 심하기 때문에 입자의 형광 영상을 ICCD나 cooled CCD를 사용하여 취득하는 것이 유리하다. 그러나, 유리 관측창을 사용하면 난반사가 심하지 않으므로 입자의 산란 영상을 일반

CCD 카메라로도 취득하여 속도장을 구할 수 있다. 그러나, 이 경우 유리와 채널 사이의 누설에 유의하여야 한다.

결론적으로 연구목적에 적합한 마이크로 채널을 제작하고 적절한 입자를 선택하여야 하며, micro-PIV 시스템 구축함에 있어서도 구성요소인 CCD 카메라, 마이크로스코프, 레이저, 필터 및 미러 등에 대한 이해가 필요하다. 또한, 여러 가지 시도를 통해 연구목적에 최적화된 micro-PIV 시스템을 구성하고 깨끗한 입자영상을 얻어야 할 것이다.