

마이크로 채널 내부 유동해석을 위한 마이크로 PIV측정기술

글 ■ 이상준 / 포항공대 기계공학과, 교수 e-mail ■ sjlee@postech.ac.kr

이 글에서는 현재 본 연구실에서 사용하고 있는 마이크로 채널 제작방법과 마이크로 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템들을 소개하고, 마이크로 채널 내부 유동의 속도장 측정 과정에서 고려하여야 할 여러 가지 문제점들에 대해 언급하고자 한다.

○ Microfluidics

최근 BT(Bio Technology), NT(Nano Technology)에 관한 관심이 높아짐에 따라 Bio-MEMS에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. Bio-MEMS는 MEMS가공기술을 생명공학 분야에 응용하는 첨단 기술로써, 생체분자의 작용 매커니즘과 혈관 내부유동의 해석 및 제어, Lab-On-a-Chip(LOC), DNA 칩, 세포의 점착력 해석 등 다양한 연구를 다루고 있다. LOC나 DNA 칩과 같은 바이오 칩의 경우, 마이크로 채널을 통해 용액과 시료를 운반한다. 구동 방법으로는 펌프로 유체에 압력을 가하는 방법과 전기장을 걸어서 electro-osmosis현상을 이용하는 EOF(Electro-Osmosis Flow) 방법이 있다. EOF 방법은 펌프와 같은 장치를 설치하지 않고 전기장만 걸어주므로 바이오 칩을 보다 소형화할 수 있다.

대부분의 고체 표면은 정전하(electrostatic charge)를 지닌 상태로 존재한다. 만약 매우 적은 양의 이온을 포함하고 있는 유체가 이러한 고체 표면을 흘러가게 되면,

고체 표면의 정전하는 유체 내부의 counterions를 끌어당기게 되어 전기장을 형성하게 된다. 이때, 고체 표면에서의 정전하와 유체 속의 전하 사이의 균형으로 인해 생기는 층을 Electric Double Layer(EDL)라고 한다. EDL은 충전층(compact layer)과 확산층(diffuse layer)의 두 부분으로 나누어진다. 충전층에서는 유체 속의 이온들이 강하게 고체 벽면쪽으로 끌어당겨지므로 유체의 움직임이 없는 부분이다. 한편 확산층 영역은 이온들이 전기장의 영향을 덜 받기 때문에 움직임이 존재하게 된다. 확산층의 두께는 고체 표면의 전위, 용적 이온 농도, 그리고 유체의 성질에 따라 수 nm부터 수 μm 에 이른다. 충전층과 확산층의 경계부에서 생성되는 전위(electric potential)를 zeta potential, ζ 라 부른다.

유체가 마이크로 채널 내부를 흘러갈 때 EDL의 mobile 부분에 존재하던 이온들은 채널의 한 쪽 끝으로 이동하게 된다. 이러한 이온의 움직임은 유체 진행 방향과 같은 방향으로 흘러가는 streaming current를 유발시키게 된다. 이렇게 흘러간 전하는 하류

부분에 축적되고 streaming potential이라고 불리는 전위와 전기장을 형성하게 된다. 이온들이 확산층 내에서 움직일 때, EDL의 streaming potential에 영향을 받아 유체를 자신들의 진행 방향으로 끌어당겨 유동 저항이 발생하게 되고 이를 electro-viscous효과라 한다.

일반적인 매크로(macro) 스케일 유동의 경우, 채널 유동의 수력반경에 비해 생성되는 EDL의 크기가 상대적으로 매우 작기 때문에 계면의 electro-viscous효과를 고려할 필요가 없다. 그러나 마이크로(micro) 스케일 유동의 경우, 생성되는 EDL 두께가 수력반경과 큰 차이가 없기 때문에 EDL의 형성은 마이크로 채널 내부의 유동특성에 크게 영향을 미치게 된다.

이와 같은 Bio-MEMS와 관련된 microfluidics분야에서 미세 채널 내부를 흐르는 유체에 대한 유동정보는 바이오 칩의 설계나 여기서 발생하는 유체 관련 문제점 해결에 활용할 수 있다. 따라서 마이크로 채널 내부 유동에 대한 정확한 해석은 이 분야 연구에 많은 기여를 할 수 있을 것이다.

이 글에서는 현재 본 연구실에서 사용하고 있는 마이크로 채널 제작방법과 마이크로 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템들을 소개하고, 마이크로 채널 내부 유동의 속도장 측정 과정에서 고려하여야 할 여러 가지 문제점들에 대해 언급하고자 한다.

○ 마이크로 채널

일반적으로 마이크로 채널은 실리콘 웨이퍼(wafer) 위에 SU-8 재질을 쌓아올려 제작하는데, 제작과정은 다음과 같다. 그림 1(a)처럼 우선 실리콘 웨이퍼 위에 SU-8 Photo-Resistant(PR)를 코팅한 후, (b) 채널 모양이 디자인된 이멀전(emulsion) 마스

크를 덮고 자외선(UV, Ultra Violet) 노광을 한다. (c) SU-8은 negative PR이기 때문에 현상(development)하고 나면 자외선에 노광된 부분만 남게 된다. 이와 같은 과정을 거쳐 제작한 마이크로 채널의 상부를 유리로 덮고 지그(jig)를 사용하여 가압방식으로 밀봉(sealing)하거나 채널의 윗부분을 glass bonding하여 채널을 완성한다. 그런데 채널의 윗부분을 지그를 사용하여 밀봉할 경우, 채널 상부와 유리 사이로 누설이 발생할 수 있다.

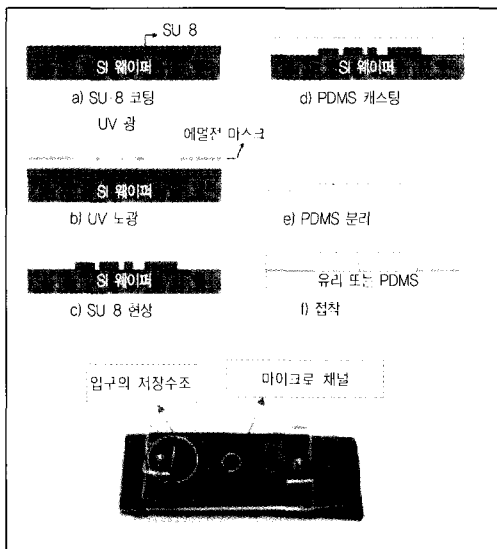


그림 1 PDMS 마이크로 채널 제작과정

이와 같은 누설 문제는 PDMS(Poly-Dimethyl-Siloxane)로 만든 마이크로 채널을 사용함으로써 해결 할 수 있다. PDMS 마이크로 채널의 제작과정은 다음과 같다. 앞에서 설명한 그림 1(c) 단계까지 만들어진 마스터(master) 위에 PDMS를 붓고(d), PDMS를 굳힌 뒤, PDMS를 마스터로부터 분리해 낸다(e). 마지막으로 분리해낸 PDMS를 평평한 PDMS 판 혹은 유리기판



위에 플라즈마로 붙이면 PDMS 마이크로 채널이 완성된다(f). 실제 DNA칩이나 LOC과 같은 바이오 칩은 이와 유사한 방법으로 제작되고 있다. 일단 만들어진 마스터를 이용하면 몰딩(molding) 방식으로 여러 개의 똑 같은 마이크로 채널을 반복적으로 쉽게 만들 수 있다.

또한 LIGA나 레이저 가공 등 다른 공정을 사용하여 다양한 형태의 마이크로 채널 마스터를 제작하는 것이 가능하다. 하지만 PDMS는 표면이 소수성(hydrophobic) 특성을 가지고 있기 때문에 EOF 유동처럼 전기장을 이용한 실험의 경우, 채널표면에 작용하는 전기적 특성이 시간과 실험조건에 따라 변화할 수 있으므로 주의하여야 한다.

마이크로 채널제작시 고려하여야 하는 사항은 다음과 같다. Microfluidics와 관련된 유동은 대부분 스케일이 매우 작으므로, 채널 및 구조물 형상의 영향을 크게 받는다. 그리고 똑같은 설계라고 하더라도 제작과정에 어떠한 공정을 거쳤는가에 따라 미세 형상 및 표면상태가 달라지기 때문에 연구목적에 맞는 제작 공정을 적절히 선택하는 것이 중요하다.

그런데 SU-8 재질을 자외선으로 노광하고 현상하여 마스터를 제작하는 MEMS 공정으로는 채널의 횡단면을 정확히 직사각형으로 제작하기 어렵다. 일반적으로 MEMS 식각공정으로 만든 마이크로 채널의 경우 채널의 밑면과 옆면 사이의 각도가 약 80° 정도로 고정되어 있으며, 채널의 깊이도 50~60μm로 제한된다. 만약 연구 목적이 미세 유동에 관한 가시화 측정기법 개발이나 바이오 칩 응용 연구이라면 SU-8 마스터를 사용하여도 무방하다. 마이크로 채널 내부 미세유동에 대한 정확한 실험결과를 얻거나 수치해석 결과와 비교하기 위해서는 직사각형 단면 형상의 채널도 필요하다.

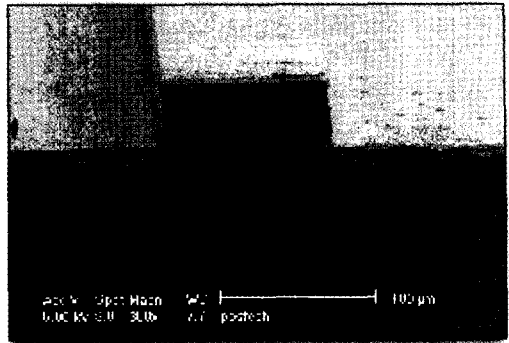


그림 2 LIGA 공정으로 제작된 미세 구조물

LIGA 공정기술을 이용하여 마이크로 채널을 제작하면 이러한 문제점을 해결할 수 있는데, SU-8 대신 PMMA(polymethylmethacrylate)를 사용하여 마스터를 제작한 후 전과 동일한 공정을 거쳐 PDMS 마이크로 채널을 만들게 된다. 그림 2는 본 연구실에서 LIGA 공정을 사용하여 제작한 마이크로 채널로 정확히 수직단면을 가지고 있으며, 종횡비가 훨씬 큰, 즉, 채널의 깊이가 깊은 마이크로 채널의 제작도 가능하다.

이밖에 RIE(Reactive Ion Etching), 레이저 가공, 초음파 가공 등으로 마스터를 제작할 수 있는데, 공정에 따라 채널 형상은 조금씩 달라진다. 앞서 언급한 바와 같이 마스터를 완성한 후에는 PDMS로 채널을 몰딩 방식으로 똑같은 PDMS 채널을 여러 개 만들 수 있다.

그리고 채널의 크기가 작아질수록 표면장력과 같은 표면력(surface force)에 의한 영향을 많이 받게 된다. 따라서 채널 벽면의 거칠기나 전기 화학적 특성은 채널 내부 유동에 영향을 주게 되므로 제작한 채널의 표면처리에도 주의하여야 한다. 이밖에 마이크로 채널을 가공하는 제작 환경(계절, 기후, 온도, 습도 등)이 채널의 미세 형상 및 표면 특성에 영향을 주게 되게 된다. 따라서 마이크로 채널의 제작 과정에 대한 정확한 인식

이 필요하다.

○ 마이크로 PIV 시스템

일반적인 매크로(macro) 스케일 유체 유동에 대한 PIV 실험에서는 유동 내 입자영상을 취득하기 위해 측정 영역에 레이저 시트를 조사하고, 산란(mie-scattering)된 입자영상을 취득한다. 그러나 마이크로 PIV 실험의 경우, 마이크로 스케일의 유동 내에 수 마이크로 크기의 얇은 레이저 시트를 광학적 방법으로 조사하기는 매우 어렵다. 따라서 체적조명(volume illumination)방법을 사용하여, 측정하고자 하는 대상물 전체를 레이저 빔으로 조명하고 렌즈의 depth of focus를 미세하게 조절하여 채널 내부 원하는 단면(초점거리에 위치한 초점평면) 내부의 입자영상을 취득하게 된다. 그런데 체적조명을 하게 되면 미세 입자로부터 산란된 빛이 채널 벽면이나 실험장치에 의한 난반사와 섞이게 되어 입자영상만을 구별해 내기가 쉽지 않게 된다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 마이크로 PIV 실험에 있어서 입자영상 취득시 입자의 형광(fluorescence) 영상을 획득하는 방식을 사용하게 된다. 이 방법은 추적입자로 형광물질이 도포되어 있는 미세 입자를 사용하여 입자로부터 형광되는 입자영상을 취득한다. 예를 들어, 입사광으로 Nd:YAG 레이저($\lambda=532\text{nm}$)를 사용한다면 사용하는 입자는 532nm 파장대에서 여기(excitation)되고 대략 600nm 파장 이상에서 형광빛을 방출(emission)하는 형광입자를 사용하는 것이 바람직하다. 이 때 CCD 카메라 전방에 대략 570nm 정도의 고대역 필터(high-pass filter)를 설치하게 되면, 조명하는 레이저의 파장(532nm)의 영상부분을 제거할 수 있어 깨끗한 입자영상을 얻을 수 있다.

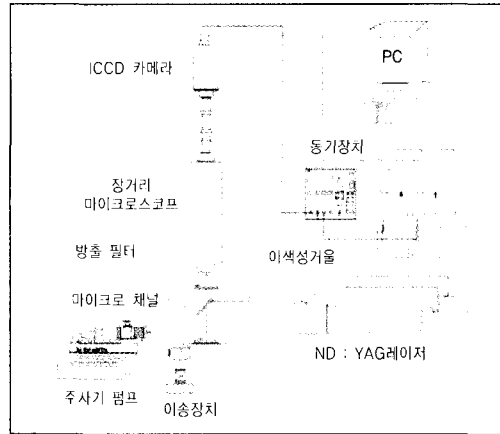
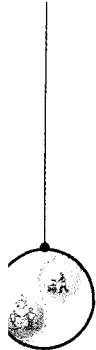


그림 3 장거리 마이크로스코프를 사용한 마이크로 PIV 시스템 구성도

그림 3은 장거리(long distance, 이후 LD로 표시) 마이크로스코프를 이용한 마이크로 PIV 시스템의 구성도를 나타낸 것이다. 여기에 사용한 LD 마이크로스코프는 초점거리가 10~25cm 정도로 일반 현미경 렌즈보다 훨씬 긴 초점거리를 가지고 있기 때문에, 실험모델 구성함에 있어 많은 공간적 여유를 확보할 수 있다. Nd:YAG 레이저(532nm)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 위해서 해상도가 1280x1024pixels인 12bit Intensified CCD(ICCD) 카메라를 사용하였다. LD 마이크로스코프와 마이크로 채널 사이에 dichroic 미러를 설치하여, 옆에서 입사하는 532nm 파장의 Nd:YAG 레이저 빔은 수직으로 꺾어 채널 내부 유동으로 조사하며, 532nm 파장에 의해 형광된 612nm 파장의 형광 입자영상은 dichroic 미러를 통과하여 CCD 카메라로 들어가게 된다. 이 때 마이크로스코프 전방에



emission 필터(570nm)를 설치하여 레이저에 의해 난반사되는 532nm 파장의 산란광을 필터링하고 형광된 입자 영상만이 마이크로스코프로 들어가도록 하였다. 이러한 마이크로 PIV 시스템 구성은 Nd:YAG 레이저 빔을 object(마이크로 채널)에 수직으로 입사하게 하는 장점이 있다. Dichroic 미러를 쓰지 않고 레이저빔이 채널에 바로 입사하게 하면, 빔이 채널 내부 유동에 도달하기 전에 채널을 구성하는 주위 구조물에 의해 굴절이나 난반사가 발생할 가능성이 많다. 이 경우 레이저 빔이 채널 시험부 내로 고르게 분포되지 않거나 시험부의 특정 부분만을 집중적으로 조명하게 되어 취득한 입자영상의 강도(intensity)가 균일하지 못할 수도 있다. 따라서 dichroic 미러를 사용하여 레이저 빔이 시험부에 도달하게 하는 것이 보다 바람직하다.

인버터(Inverted) 마이크로스코프를 이용한 마이크로 PIV 시스템의 개략도는 그림 4와 같다. 레이저 빔을 채널내부로 입사시켜 시험부(마이크로 채널)를 조명하였으며, 레이저 빔으로부터 CCD 카메라를 보호하기 위해 약간 비스듬하게 레이저 빔의 방향을 구성하였다. 산란된 입자영상은 대물렌즈(objective lens)에 의해 확대되고 고대역 필터(570nm high-pass filter)로 레이저 빔에 의한 난반사 이미지(532nm 파장대)를 제거하고 입자의 형광 영상입자만을 cooled CCD 카메라로 들어가도록 하였다. Cooled CCD 카메라는 센서 온도를 -12°C 까지 냉각시키므로 영상 취득시 카메라 암전류(dark current)에 의해 발생하는 노이즈(noise)를 최소화시킴으로써 깨끗한 영상을 얻을 수 있게 한다. Cooled CCD 카메라의 해상도는 $1280 \times 1024 \text{ pixels}$ 이며, 한 픽셀 크기는 $6.7 \mu\text{m} \times 6.7 \mu\text{m}$ 그리고 12bit의 영상정보를 담고 있다. Inverted 마이크로

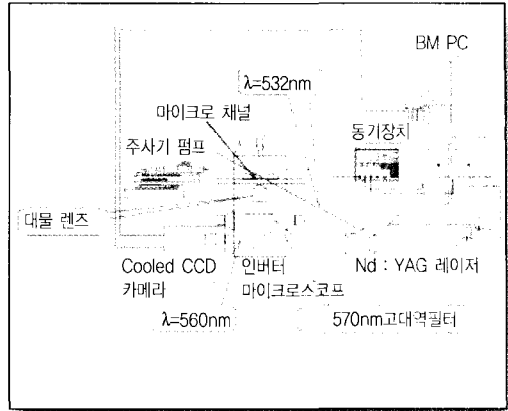


그림 4 인버터 방식의 마이크로스코프를 사용한 마이크로 PIV 시스템

스코프는 내장된 필터세트에 dichroic 미러를 장착할 수도 있으나, dichroic 미러를 사용할 경우에는 형광된 빛의 세기가 dichroic 미러에 의해 다소 감소하는 단점이 있다. Dichroic 미러를 사용하지 않기 위해서는 레이저 빔이 직접적으로 CCD 카메라로 들어가지 않으면서 측정영역 내부를 고르게 조사할 수 있도록 광학장치를 구성하여야 한다.

그림 5는 LD 마이크로스코프로 취득한 직경 $3 \mu\text{m}$ 크기의 형광입자영상(a)과 invert 마이크로스코프를 사용하여 직경 $1 \mu\text{m}$ 의 형광입자를 취득한 영상(b)을 보여주고 있다.

PDMS 마이크로 채널을 이용한 PIV실험의 경우, 채널 벽면이나 PDMS 재질 자체로부터 난반사가 심하기 때문에 입자의 형광영상을 ICCD나 cooled CCD를 사용하여 취득하는 것이 유리하다. 그러나 마이크로 채널 제작시 유리 관측창(주로 뚜껑)을 만들게 되면 PDMS에 비해 난반사가 심하지 않으므로 일반 CCD 카메라로도 입자의 산란영상을 얻어 속도장을 구할 수 있다. 이 경우에는 유리와 채널 사이의 누설에 유의하여야 한다.

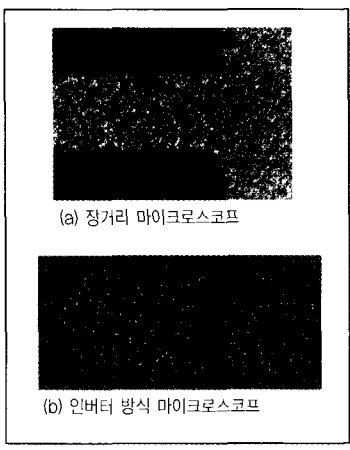


그림 5 마이크로 PIV로 취득한 입자영상

○ 마이크로스코프 및 입자

앞서 언급한 LD 마이크로스코프는 초점거리가 상당히 길기 때문에, 실험모델을 구성하는데 많은 공간적 여유가 있으며, 풍동이나 수조 내부에 놓인 물체 주위의 미세유동 연구에도 사용할 수 있다. 또한, 이것을 사용하게 되면, 일반 마이크로스코프에서 나타나는 짧은 초점거리에 기인한 영상왜곡(optical aberration) 문제도 최소화할 수 있다. 그러나 초점 거리가 길어질수록 렌즈의 측정 각도가 좁아져 입자 획득의 감도가 획득할 수 있는 빛의 광량은 줄어드는 단점이 있다. 따라서 LD 마이크로스코프를 사용하게 되면 입자의 크기가 너무 작을 경우 깨끗한 입자영상을 획득하기 어려워지게 된다. 반면 인버터 마이크로스코프는 LD 마이크로스코프보다 깨끗한 입자영상을 제공하였다. 또한 optics나 마이크로 채널을 align 함에 있어서 매우 편리한 장점을 가지고 있다. 그러나 장착하는 대물렌즈에 따라 광학적 왜곡(aberration)이 발생할 수도 있으므로 실험시 주의하여야 한다.

깨끗한 입자영상을 얻기 위해서는 사용 중

인 레이저에 가장 적합한 형광입자를 선택하여야 하며, dichroic 미러 및 필터의 선택에는 입자의 여기 및 방출 파장특성에 대한 충분한 이해가 요구된다. 본 연구실에서는 직경이 약 0.3 μ m, 0.5 μ m, 0.8 μ m, 1 μ m, 3 μ m인 빨강색으로 형광 코팅된 폴리머 구형입자를 사용하고 있는데, 이 입자들은 542nm 파장의 빛에 여기하고, 612 nm 파장에서 형광 빛을 방출한다. 여기서 이야기하는 파장은 여기 혹은 방출 특성을 나타내는 파장 곡선의 peak값을 의미하며, 형광 입자 및 필터를 선택함에 있어서는 peak값뿐만 아니라 해당하는 광학특성이 어느 파장까지 분포해 있는지에 대해 이해하는 것이 중요하다. 수백 나노미터 크기의 미세입자를 추적 tracer로 사용하게 되면, 입자끼리의 응집성, 입자들의 벽면과의 협착 입자와 입자 사이의 상호작용에 기인한 영향, Brownian 운동 등과 같은 여러가지 문제들이 발생한다. 이밖에 electrokinetics 관련 연구를 위해서는 입자들의 정전하(electrostatic charge) 특성에 관한 정보도 필요하다. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 입자역학 관점에서 마이크로 채널 내부 미세 나노입자들의 거동에 관한 자세한 연구가 요구되어진다.

○ 맺음말

마이크로 채널 내부 유동해석 연구에는 주어진 실험조건이나 연구목적에 적합한 마이크로 채널을 제작하고 적절한 입자를 선택하여야 하며, 마이크로 PIV시스템 구축에 있어서도 구성요소인 CCD 카메라, 마이크로스코프, 레이저, 필터 및 미러 등에 대한 정확한 이해가 필요하다.