

미세유로 내부에서의 3차원 유동장 측정 기술

김 경 천 · 부산대학교 기계공학부, 교수

_e-mail : kckim@pusan.ac.kr

이 글에서는 defocusing의 개념을 마이크로 스케일에 적용하기 위해 calibration에 기반을 둔 방법을 이용하여 보다 유용하고 편리하게 3차원 유동장을 측정할 수 있는 방법을 소개한다.

머 리 말

레이저를 이용한 체적 조명과 초점 깊이의 개념을 이용한 마이크로입자영상유속계(Micro-PIV) 기법은 마이크로 채널 내부의 2차원 속도장을 측정하기 위해 개발되었으며, 마이크로 채널 내부의 2차원 속도장을 정확하게 측정할 수 있는 기술로 평가 받고 있다. 그러나 마이크로 스케일에서 어떤 유동은 마이크로 시스템의 형상과 기능에 의해 3차원적인 구조를 가지고 있다. 뿐만 아니라 세포를 기반으로 하는 연구에 있어서 세포내부 입자의 3차원 정보를 획득하는 것은 매우 중요하다.

3차원 유동측정은 유체유동 연구분야에서 많은 각광을 받고 있

는 주제 중 하나로 홀로그래픽 입자영상유속계, 3차원 디지털 입자영상유속계, 디지털 홀로그래픽 입자영상유속계, defocusing 디지털 입자영상유속계 등의 다양한 기법을 이용한 연구들이 진행되어 왔다. 홀로그래피 원리를 이용한 디지털 마이크로 홀로그래픽 입자영상유속계는 3차원 유동 측정은 가능하지만 측정을 위해서는 복잡한 시스템이 필요하고 해석에 있어서 많은 어려움이 있다. Defocusing의 개념은 F. Pereiral과 M. Gharib에 의해 최초로 제안되었다. 그들은 defocusing에 대한 광학적 해석과 함께 방정식들을 유도하였으며 이것을 이용하여 입자의 3차원 위치를 추적할 수 있는 방법을 개발하였다. 그러나 매크로

스케일에서 제안된 defocusing의 기하학적 해석과 방정식들은 광학계 구성의 차이와 마이크로 스케일에서 기인하는 제약 때문에 마이크로 스케일에 직접적으로 이용될 수 없다. 따라서 defocusing의 개념을 마이크로 스케일에 적용하기 위해 calibration에 기반을 둔 방법을 이용하여, 보다 유용하고 편리하게 3차원 유동장을 측정할 수 있는 방법을 소개한다.

마이크로 스케일에서 Defocusing 기법

마이크로 스케일에서 defocusing의 기본적인 개념은 매크로스케일에서와 동일하다. 그림 1에서와 같이 정삼각형을 이루는

3개의 핀홀을 가지는 마스크가 대물렌즈 위에 위치하고 있다. 입자로부터 방사된 빛은 각각의 핀홀을 통과하여 화상평면(image plane)위의 서로 다른 세 지점에 도달한다. 입자의 위치가 초점면

(reference plane)에서 깊이 방향으로 멀어질수록 화상 평면 위의 세 점 사이의 거리는 멀어진다. 이러한 원리를 이용하여 화상평면 위의 삼각형 패턴의 크기로부터 깊이 방향의 입자 위치를

근사할 수 있게 되는 것이다.

그러나 앞에서 언급한 것과 같이 매크로 스케일에서와 달리 마이크로 스케일에서는 작동거리(working distance)가 렌즈와 화상 평면 사이의 거리보다 훨씬 짧고 대물렌즈의 직경이 매우 작으므로 매크로 스케일에서 광학적 해석을 위해 사용되었던 가정들을 그대로 적용할 수 없다. 또한 마이크로 스케일에서의 측정 장치들은 상대적으로 복잡한 광학계를 구성하고 있으므로 해석에 필요한 변수들을 정확하게 정의하기 어려우므로 광학적 해석을 통해 입자의 3차원 위치를 정확하게 근사하기가 불가능하므로 calibration에 기반을 둔 측정 방법이 보다 편리하고 쉽게 이용될 수 있다.

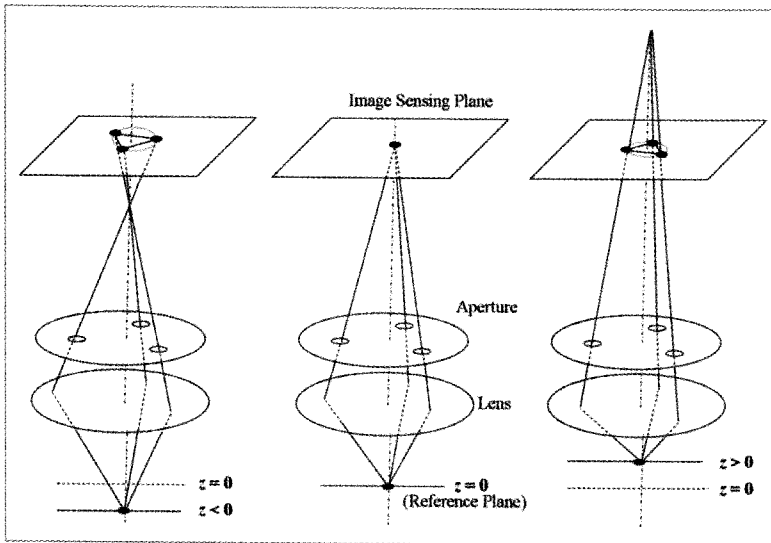


그림 1 마이크로 스케일에서의 defocusing 개념도

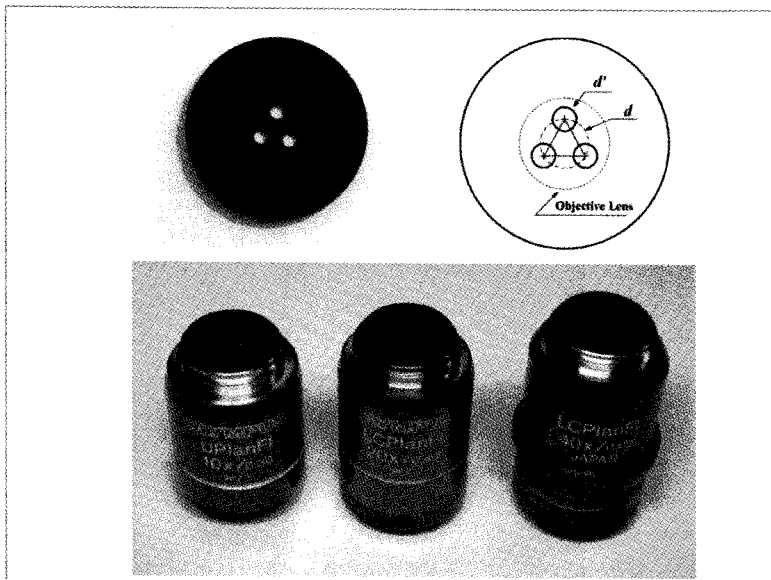


그림 2 핀홀 및 렌즈 배치 사진

광학계통

Defocusing 마이크로 입자 추적계(Micro-PTV) 기법의 핵심이 되는 광학적 구성 요소는 그림 2에 보이는 것과 같은 세 개의 핀홀을 가진 원판이라고 할 수 있다. 이 원판은 대물렌즈 위에 위치하며, 원판에 뚫려 있는 각 핀홀의 중심은 정삼각형의 정점에 위치하도록 설계되었다. 또한 각 핀홀의 직경은 마이크로 시스템에서의 낮은 광 강도를 감안하여 매크로 스케일에서보다 상대적으로 크게 제작되었으며, 원판의 두께는 0.2mm이다.

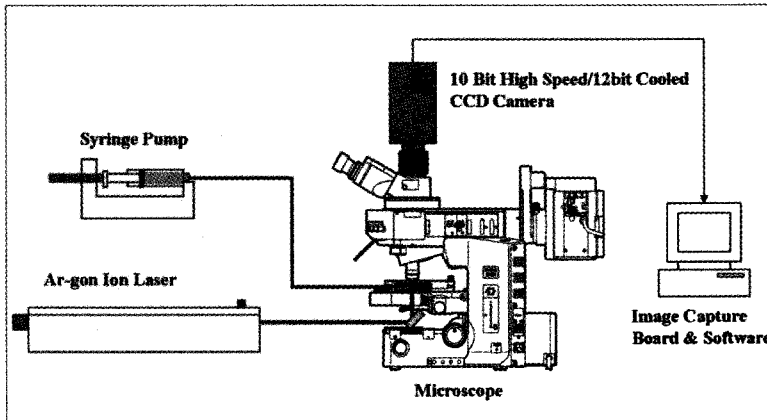


그림 3 Defocusing micro-PTV 시스템 구성

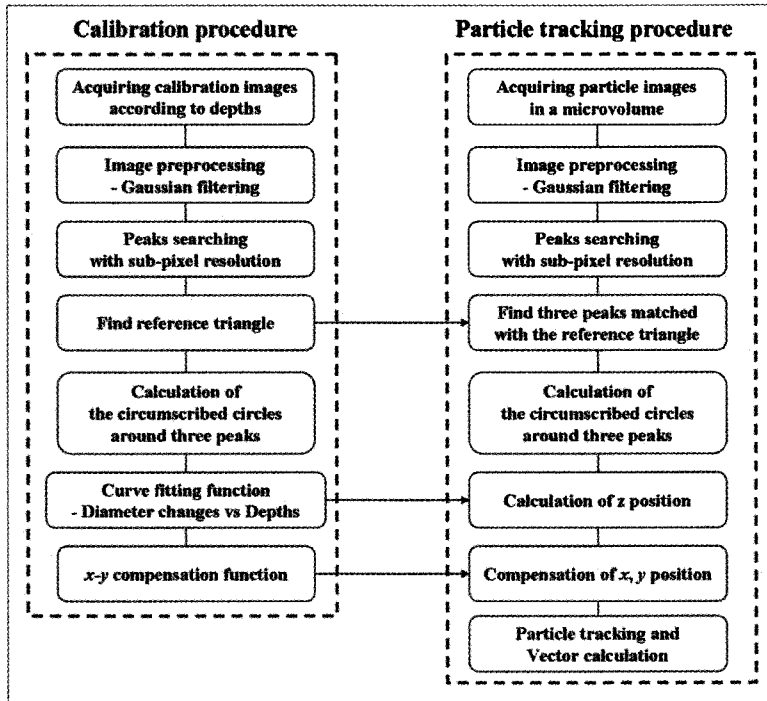


그림 4 3차원 속도 측정을 위한 교정 및 측정 절차

그림 3은 defocusing 3D Micro-PTV 방법을 적용하기 위한 일반적인 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 입장의 영상을 획득하기 위해서는 고감도 cooled CCD 카메라나 초고속 CCD 카

메라가 주로 이용되며, 광원으로는 Argon-ion 레이저를 사용한다. 또한 낮은 마이크로 시스템에서의 낮은 광 강도를 보상하기 위해 3 μ m 직경의 비교적 큰 형광 입자를 이용한다.

교정기법

그림 4는 defocusing 3D Micro-PTV 측정의 전체적인 흐름도를 나타내고 있다. 처리절차는 대략적으로 calibration과 3차원 입자 추적의 두 단계로 구성된다. 대부분의 디지털 영상처리 기법을 기반으로 하는 3차원 측정방법들은 입자의 위치를 근사하기 위해 calibration 과정을 필요로 하며, 이 과정은 반드시 깊이 방향으로 이루어져야 한다. Defocusing 3D Micro-PTV 기법에서 적용된 calibration 과정은 아래와 같이 순서대로 나열할 수 있다.

- 깊이 방향에 따른 입자의 calibration 이미지 획득
- 이미지의 선 처리(pre-processing) 및 정삼각형을 이루는 3개의 입자 찾기
- 기본삼각형(reference triangle) 패턴 정의
- 삼각형 패턴을 이용해 만들어진 외접원의 중심과 직경 계산
- 외접원의 직경에 따른 입자의 z 방향 위치관계 함수 결정
- x-y 위치의 보정 함수 근사

이와 같은 calibration 과정을 통해 구해진 calibration 함수와 기본 삼각형(reference triangle)은 측정의 다음 단계인 입자 추적 과정에서 다시 이용될 수 있으며 그 과정은 다음과 같다.

- 마이크로 부피 내에서의 입자 이미지 획득
- 이미지 선 처리 및 입자 이미지의 피크(peak) 찾기
- 기본 삼각형패턴을 이용한 피크점 매칭
- 삼각형 패턴의 외접원의 중심점 위치와 직경 계산
- Calibration 함수를 이용한 입자의 z 방향 위치 근사
- x-y 위치 보정 함수를 이용한 x-y 위치 수정
- 입자 추적 및 속도 벡터 계산

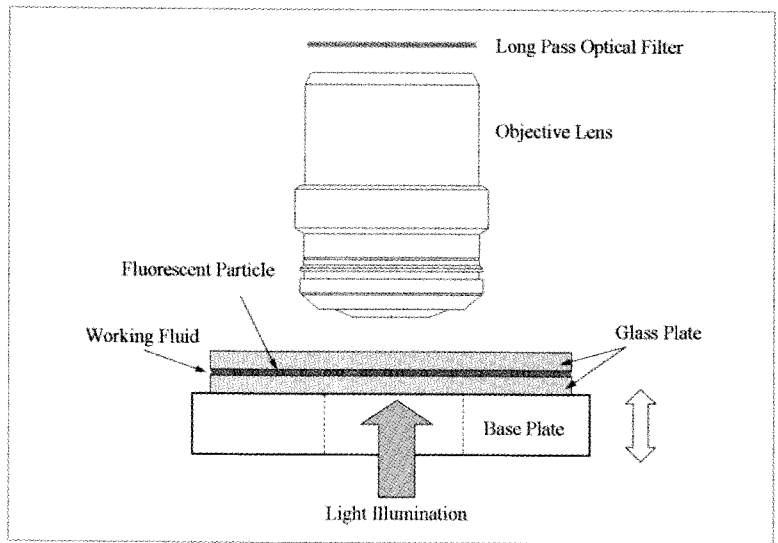


그림 5 교정 타겟

교정용 타겟 및 영상

Defocusing 3D micro-PTV에서의 교정은 그림 5에서 보는 것과 같이 두 개의 유리판에 입자를 고정시킨 타겟을 이용하여 이루어진다. 이 과정에서 측정과 교정 사이에서 굴절률 차이에 의한 광학적 오차를 피하기 위해 입자는 실험에 사용되는 것과 동일한 작동 유체 속에 담기게 하고 위에 덮이는 유리판 역시 마이크로 채널의 덮개로 이용되는 유리판과 동일한 것을 이용한다.

그림 6은 초점면($z=0$)에서 깊이 방향으로 위치를 옮겨가며 획득한 입자의 이미지를 나타내고 있다. 입자로부터 조사한 형광 빛은 세 개의 핀홀을 통과 하여 화상 평면 위의 서로 다른 지점에 이미지를 형성하게 된다. 그림 6(a)는 대물렌즈로부터 멀어지면 획득한 입자의 이미지들이고 그

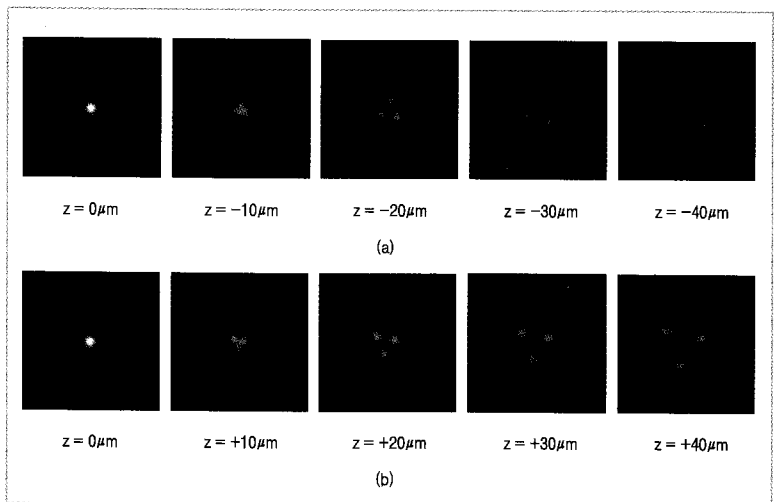


그림 6 위치에 따른 영상

림 6(b)는 대물렌즈에 가까이 가면서 획득한 입자의 이미지들이다. 입자는 대물렌즈에 위치한 원판의 세 핀홀에 의해 정삼각형의 세 정점에서 이미지를 형성하고 기준면에서 멀어질수록 그 크기가 증가함을 알 수 있다. 그리고 입자가 기준면에서 서로 다른 방

향으로 움직일 때 형성되는 삼각형 패턴은 점을 중심으로 서로 반대의 형상을 이루는 것을 볼 수 있는데 이는 광선이 화상평면 앞에서 서로 교차하기 때문이며 이러한 특성은 깊이 방향으로의 측정 영역을 결정하는 데 이용될 수 있다.

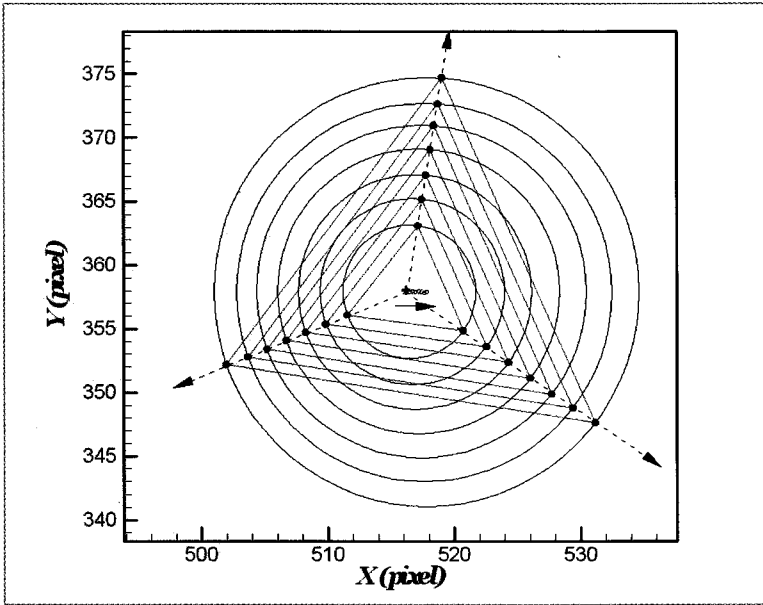


그림 7 교정용 이미지로부터 얻은 삼각형과 외접원

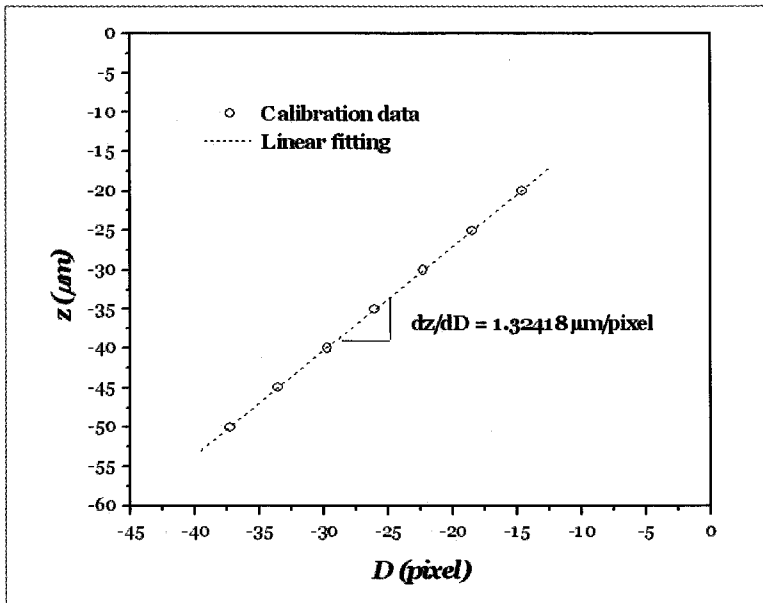


그림 8 교정 곡선

이와 같은 방법을 통해 얻어진 교정 이미지들은 이미지 후처리 과정을 통해 sub-pixel 수준에

서 피크점을 찾는데 이용되며, 각 피크점들은 그림 7에서 보는 것처럼 각각의 피크점에 외접하는

원을 형성하여 그 외접원의 직경 변화로부터 깊이 방향의 이동 거리를 근사하게 된다. 그림 8은 이러한 외접원의 직경변화와 깊이 방향의 변화를 최소 자승법을 이용하여 선형 곡선적합(curve fitting)한 결과를 나타내고 있다.

후향계단 유동의 3차원 속도장 측정에

이와 같이 입자의 3차원 위치를 추적할 수 있는 defocusing 3D Micro-PTV 기법은 실제적으로 backward-facing-step 마이크로 채널에서의 3차원 유동 측정에 적용될 수 있다. 정상상태의 backward-facing step 유동은 비교적 간단한 유동 구조를 가지고 있으며, 그 해가 잘 알려져 있으므로 전산해석에서 코드 검증이나 측정기법의 정확성 검증에 자주 이용되어 왔다. 그림 9는 defocusing 3D Micro-PTV 기법을 적용하기 위해 PDMS로 제작된 backward-facing step 마이크로 채널의 형상을 나타내고 있다. 스텝의 높이 $h=18\mu\text{m}$ 이고, $L_i=5\text{mm}$, $L_o=5\text{mm}$, 그리고 채널의 넓이 $L_y=2\text{mm}$ 이다. 그리고 채널로 유입되는 유체의 유량은 $3\mu\text{l}/\text{min}$ ($U_\infty = 1.39\text{mm}/\text{s}$)으로 입구쪽에서 Reynolds number는 0.025의 조건에서 실험하였다.

그림 10은 마이크로 채널 내부

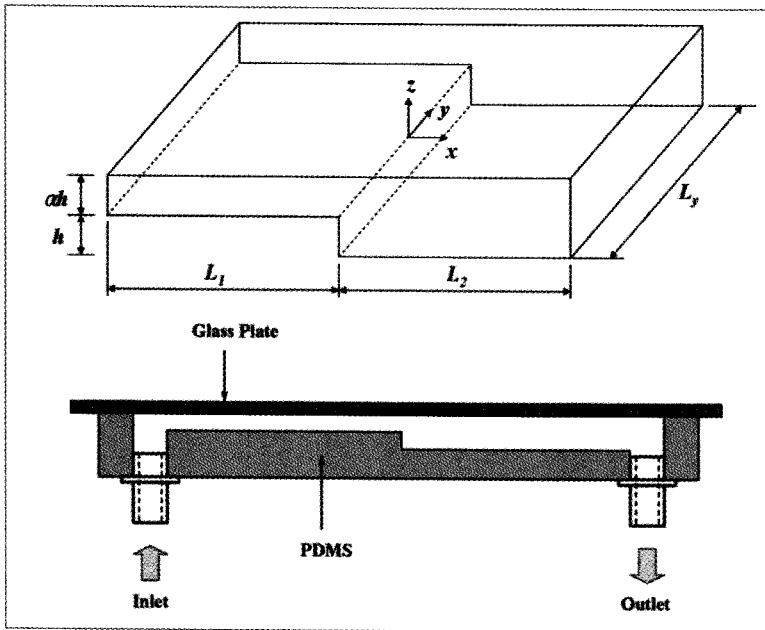


그림 9 마이크로 채널 형상

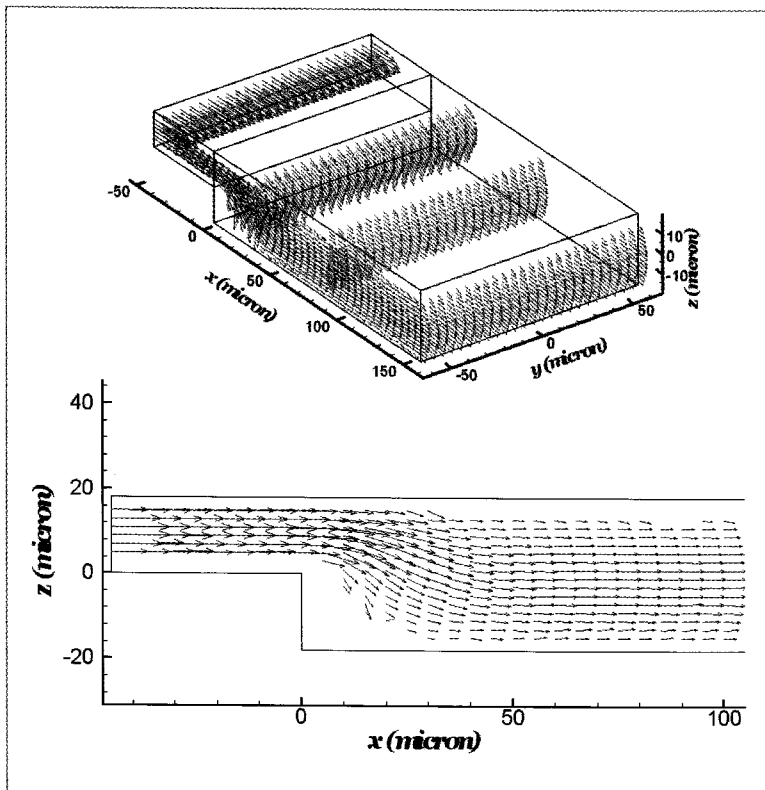


그림 10 3차원 속도장

에서의 3차원 속도장을 보여준다. 입자의 추적과 속도 벡터는 입자의 순간 위치로부터 쉽게 계산될 수 있다. 초고속 카메라를 이용하여 획득된 순차적 이미지들로부터 추출된 여러 입자의 궤적으로부터 그림 10에 나타난 것과 같은 속도 벡터로 변환될 수 있다. 이 기술을 이용하면 그림 10에 보이는 것과 같이 x,y 방향으로로는 $5\mu\text{m}$, z방향으로는 $1\mu\text{m}$ 의 정도(resolution)에서 공간에서의 3차원 속도장을 획득할 수 있다.

맺음 말

이상에서 살펴본 바와 같이 교정에 기반을 둔 defocusing 3D micro-PTV 기법은 미세부피에서 입자의 3차원 추적 및 3차원 속도장 측정에 비교적 쉽고 편리하게 적용될 수 있음을 알 수 있다. 이 기법은 여러 종류의 미세광학 시스템에 직접 적용될 수 있으며, 높은 배율의 대물렌즈와 영상증폭기를 이용한다면 보다 정확하고 정밀한 측정이 가능하다. 또한 이 측정 방법은 cell biology와 같은 micro/nano 입자를 기반으로 하는 연구와 마이크로시스템의 설계 및 성능 평가를 필요로 하는 연구와 같은 다양한 적용분야가 있을 것으로 기대된다.