

## 하이브리드 마이크로/나노 PIV 시스템 개발

민영욱\* · 이동엽\* · 김경천\*\*

### Development of Hybrid Micro/Nano PIV system

Young Uk Min, Dong Yeop Lee and Kyung Chun Kim

**Abstract.** In this study, a novel hybrid micro/nano PIV system combining defocusing and TIRFM technique has been developed for the multiscale flow measurement. With the developed system, both far and near field velocity fields have been measured simultaneously in a 2D straight microchannel and the particle trajectories were extracted by the nearest tracking algorithm. The shear rate values taken from experimental results have been estimated by comparing with the analytical solution of 2D Poiseuille flow and it is confirmed that the result shows good agreement with the theoretical value.

**Key Words:** Hybrid micro/nano PIV system(하이브리드 마이크로/나노 입자영상유속계 시스템), Defocusing(디포커싱), TIRFM(전반사형광현미경시스템)

#### 1. 서 론

미세유체소자 내의 유동측정기법인 Micro-PIV 기법은 유동가시화의 표준화 기법으로 미시영역의 유동현상 규명에 널리 활용되고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나, 유체유동은 3차원적 현상으로 2차원 유동의 측정에 특화된 기존의 측정기법은 입체적이고 복잡한 미세유체의 유동구조를 정밀하게 측정하는데 한계를 가질 수 밖에 없었다<sup>(2)</sup>. 이러한 한계를 극복하기 위해 개발된 3차원유동측정 기법으로는 대표적으로 stereoscopic micro-PIV<sup>(3)</sup>, digital-holographic PTV<sup>(4)</sup> 기법 등이 있으나 2D3C에 국한되는 유동장정보를 제공하거나 시스템의 구성이 복잡한 단점 등을 가졌다. 한편 3D3C의 속도장측정을 위해 Willert와 Garib<sup>(5)</sup>는 단순한 aperture의 설치만으로 3차원 유동측정이 가능한 디포커싱 측정기법을 처음으로 소개하였으며 Pereira 등<sup>(6)</sup>은 이 기법을 활용하여 버블유동장을 측정하고 디포커싱 디지털PIV(DDPIV)기법이라 명명하였다. Yoon와 Kim<sup>(7)</sup>은 이러한 디포커싱 디지털 PIV기법을 마이크로 분야에 적용할 때 발생할 수 있는

이론적 문제들을 극복하고자 캘리브레이션을 기초로 하는 미세유체유동의 3차원 측정기법을 확립한 바 있다. 또 다른 3차원 유동측정기법으로 벽면으로부터 수 백 나노미터에 이르는 영역에서 유체 내의 나노입자의 3차원 거동을 정밀하게 해석하는 TIRFM기법이 Benerjee와 Kihm<sup>(8)</sup>에 의해 소개되었으며, 이를 바탕으로 Li와 Yoda는 Poiseuille 유동조건하에서 벽면근처 나노입자의 속도장을 측정함으로써 MnPIV (Multi-layer nano PIV) 기법을 확립하였다. 이와 같은 측정기법들은 세포 및 물질전달과 관련된 생체공학연구에서 대사현상을 해석할 수 있는 유용한 측정기법들로써, 특히 생체유체의 유동과 밀접하게 관련된 세포의 반응현상을 규명하기 위해서는 마이크로와 나노영역에서 유체유동 및 입자의 거동을 동시에 측정할 수 있는 시스템이 무엇보다 필요하다고 할 수 있다.

본 연구는 이에 디포커싱 PTV기법과 TIRFM기법을 연동하여 멀티스케일의 동시유동 측정이 가능한 하이브리드 마이크로/나노 PIV시스템을 개발하고자 하였다. 이를 위하여 앞서 개발된 디포커싱 마이크로 PTV기법을 개선하고자 식각공정을 통해 제작된 타겟을 캘리브레이션에 이용함으로써 3차원 위치분석에 영향을 줄 수 있는 특성 인자들을 분석하고 그 영향을 고찰하였으며 TIRFM기법을 바탕으로 마이크로채널의 벽면

\*부산대학교 대학원 기계공학과

\*\*부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

근처에서 거동하는 나노입자의 전단율을 정량적으로 분석하는 연구를 수행하였다. 실험결과를 이론적인 Poiseuille 유동의 2차원 프로파일과 비교분석을 통해 데이터의 정밀도를 평가하였으며 개별시스템에서 얻은 측정결과를 하이브리드 시스템의 결과와 비교하여 정확도를 평가하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

멀티스케일의 동시유동측정을 위한 하이브리드시스템 실험장치의 개념도는 Fig. 1(a)와 같다. 시스템은 크게 마이크로채널 상부에서 마이크로입자의 3차원 거동을 측정하는 디포커싱 시스템 장치와 하부에서 나노입자의 거동을 측정하는 TIRFM 시스템으로 구성되어 있다. 유동장 내의 마이크로 입자의 높이변화에 따라 디포커싱된 3개의 홀 이미지를 생성하기 위해 사용된 aperture는 Fig. 1(b)와 같으며 기계가공을 통해 제작하고 대물렌즈의 상부에 설치하였다. 디포커싱 시스템의

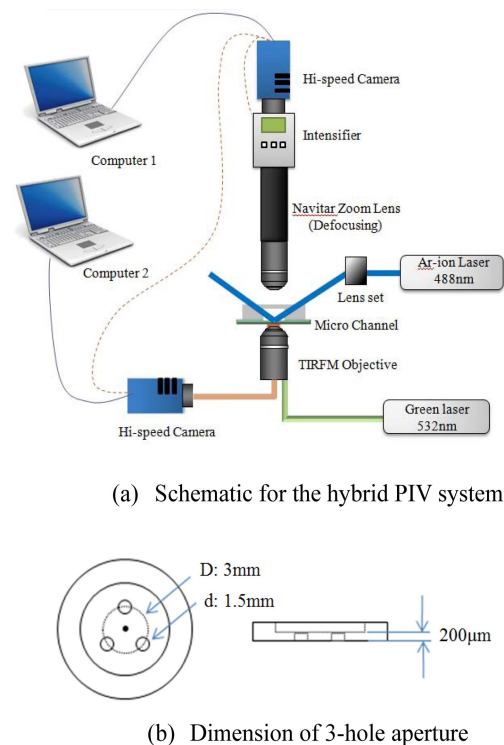


Fig. 1. Experimental setup for the hybrid PIV system.

aperture로 인한 광량의 감소를 보완하기 위하여 영상 증폭장치(invisible vision, UVi)를 추가적으로 설치하였다. 하부의 TIRFM시스템은 광원의 전반사에 따른 evanescent wave 생성조건을 만족시키기 위하여 SNR 비가 상대적으로 우수한 objective-based TIRFM 시스템을 구축하였으며 이 시스템에는 oil-immersion 타입으로 60배의 배율을 가지는 TIRFM전용 대물렌즈(Olympus, 1.45 NA)가 사용되었다.

이 두 시스템의 광원으로는 488 nm의 파장의 Ar-ion 레이저와 532 nm의 파장의 Green DPSS 레이저가 사용되었으며 각각의 광원은 조명을 위해 유동장 내로 동시에 조사되었다. 이 때 사용된 입자는 5 μm 직경의 Green 계열 입자(Duke, G0500)와 0.49 μm의 Red 계열 입자(Duke, R500)로서 이를 증류수에 혼합하여 작동 유체로 사용하였다. 각 시스템을 통하여 유입되는 형광을 선별적으로 취득하기 위하여 두 개의 BP필터를 개별적으로 사용하여 이미지를 취득하였으며 영상 이미지는 BNC케이블을 통해 동기화가 이루어진 두 대의 10 비트 고속 CMOS카메라(PCO, pco.1200hs, 1280×1024 resolution)를 통하여 획득하였다.

### 2.2 캘리브레이션

유동측정을 수행하기 전 각 시스템은 캘리브레이션을 통해 구성된 특정실험조건 하에서 입자의 정량적 위치를 환산하기 위한 보정곡선 및 관계식을 구하였다. Fig. 2는 디포커싱 시스템의 캘리브레이션을 위한 타겟과 실험셋업에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 기존<sup>(7)</sup>에는 입자의 높이에 따른 3-hole의 이미지를 얻기 위하여 표면에 마이크로 입자가 부착된 슬라이드글라스를 마

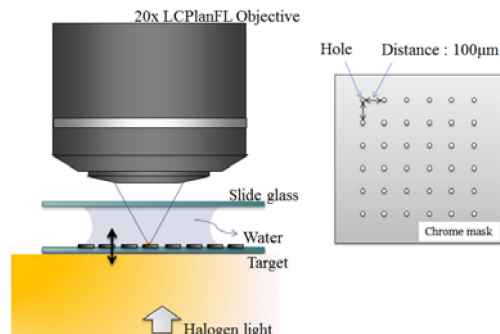


Fig. 2. Schematic for the calibration target and setup.

이크로 스테이지에 부착한 뒤 레이저 조명에 산란되는 입자영상을 획득하였으나 입자의 부착상태를 유지하기 힘들고 평면왜곡을 보정하기 위하여 정간격으로 배열된 입자의 이미지를 취득하는 것이 불가능한 단점이 있었다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 크롬이 증착된 유리기판 위에 식각공정을 통해 3 μm의 직경을 가지는 구멍이 100 μm의 간격으로 배열된 타겟을 제작하고, 타겟 하부로부터 조사된 할로겐광원에 의해 디포커싱 이미지를 획득하였다.

Fig. 3(a)는 TIRFM시스템에서 evanescent wave의 생성 및 나노입자의 위치 측정에 관한 개념을 나타낸 것이다. 굴절률이 다른 두 개의 투명한 매질의 경계면을 단일광이 통과할 때 Snell's law에 의해 정의된 임계각도를 초과하여 입사광이 조사되면 광은 전반사를 일으키게 된다. 이 때 전반사가 이루어지는 표면에서는 전자기파가 경계면에 평행하게 진행하는 구간이 존재하고 이 때 나오는 광을 evanescent wave라 한다. 이 광은 경계면에서 거리가 멀어질수록 광강도가 지수적으로 감소하는 특성을 가지므로 이 광에 의해 산란된 입자들의 광량을 측정하면 역으로 입자 간의 상대높이를

를 측정할 수 있게 된다. 입사각에 의해 정의되는 evanescent wave의 침투깊이(Penetration depth)는 식 (1)과 같이 정의되고, 이 때 입자가 산란되는 광강도(I(z))와 표면에 부착된 입자의 광강도(I<sub>0</sub>)값을 (2)의 식에 근거하여 계산함으로써 입자의 깊이방향 위치를 측정하였다.

침투깊이 측정을 위한 캘리브레이션 시스템은 Fig. 3(b)와 같이 구성하였다. 레이저에서 조사된 광은 광섬유를 지나 현미경시스템의 converging 렌즈를 통해 집광되고 정렬유닛의 마이크로미터를 조절함으로써 입사경도가 변하게 된다. 이 때 내부 렌즈시스템의 중심축과 입사광의 광축(optical axis)간 거리(Δx)변화에 따라 대물렌즈 표면에서의 입사각이 변하게 되며 삼각프리즈으로부터 굴절되어 나오는 광각(θ<sub>4</sub>)을 측정함으로써 식(3)의 관계식을 통해 입사광의 입사각(θ<sub>1</sub>)을 계산하였다.

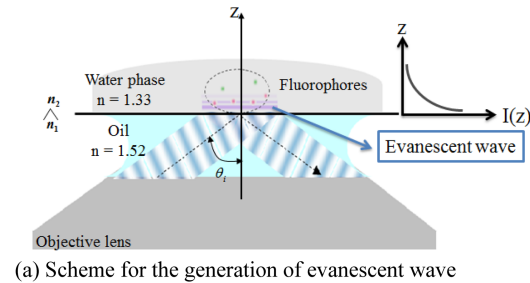
$$z_p = \frac{\lambda_0}{4\pi} (n_i^2 \sin^2 \theta - n_t^2)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$I(z) = I_0 e^{-\left(\frac{z}{z_p}\right)} \quad (2)$$

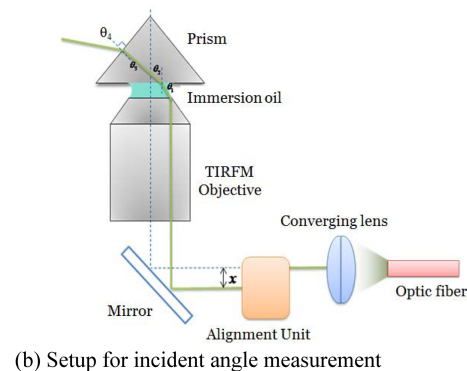
$$\theta_1 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_{prism}}{n_{oil}} \times \sin \left( \frac{\pi}{2} + \sin^{-1} \left( \frac{n_{air}}{n_{prism}} \times \sin \theta_4 \right) \right) \right\} \quad (3)$$

2.3 실험조건 및 채널형상

Fig. 4는 하이브리드 시스템을 이용한 유동측정을 위해 제작된 직관채널을 나타낸 것이다. MEMS식각공정을 통해 제작된 Photoresist패턴을 몰드로 하여 PDMS채널을 제작하였으며 이 때 단면의 높이는 100 μm, 깊이는 1 mm가 되도록 하여 형상비를 크게 함으로써 2D 유동의 특성을 갖도록 하였다. 5, 7.5,



(a) Scheme for the generation of evanescent wave



(b) Setup for incident angle measurement

Fig. 3. Calibration setup of the TIRFM system.

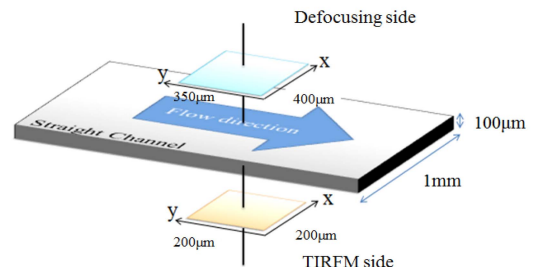
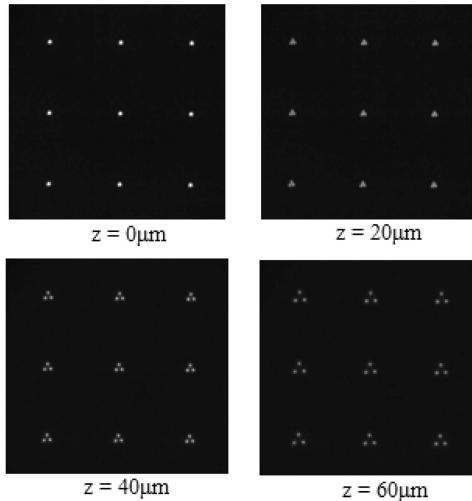


Fig. 4. Schematic of channel design.

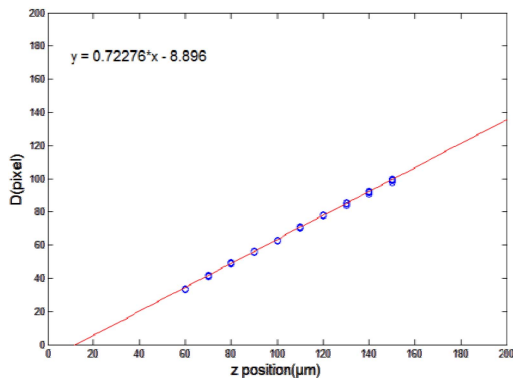
10  $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 세 가지 체적유량에 대해 유동측정 실험을 수행하였으며 이에 해당하는 레이놀즈수는 각각 0.083, 0.125, 0.166 로서 층류영역에 해당하였다. 디포커싱 시스템과 TIRFM시스템의 측정영역은 중심축이 일치하도록 하여 동시측정을 수행하였으며 각 시스템으로부터 획득된 500개의 속도장을 각각 평균하여 속도분포 및 전단율을 계산하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 5(a)는 디포커싱 시스템의 캘리브레이션을 통해 얻은 결과로서 초점영역으로부터 타겟의 거리가 증가함에 따라 디포커싱 이미지가 형성되는 것을 확인할

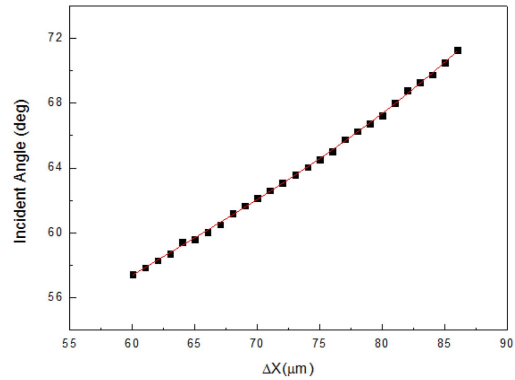


(a) Defocused hole images of target along the height

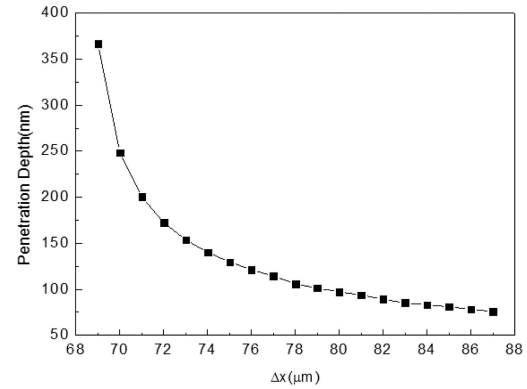


(b) Relation between z(height) and D(diameter)

Fig. 5. Calibration results of the defocusing setup.



(a) Incident angle variation



(b) Penetration depth variation

Fig. 6. Calibration results for the TIRFM system.

수 있다. 세 점을 지나는 원의 직경(D)과 높이(z)간의 관계식은 1차 선형 회귀법을 통해 Fig. 5(b)와 같이 구할 수 있었다.

Fig. 6(a)는 TIRFM시스템의 캘리브레이션 결과로 정렬유닛의  $\Delta x$ 가 증가함에 따라 입사각이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 입사각의 증가에 따라 침투깊이가 Fig. 6(b)와 같이 감소함을 확인할 수 있었으며 3차원 Polynomial fitting을 통해 식(4)와 같은 관계식을 얻을 수 있었다.

$$f(\theta) = 1.44284 * 10^{-4} x^3 - 0.02716 x^2 + 2.16595 x - 5.94224 \quad (4)$$

본 연구에서 전반사가 일어나는 임계각은  $60.835^\circ$  ( $\Delta x = 68.5 \mu\text{m}$ )였으며 실험에 사용된 침투깊이는  $316 \text{ nm}$ 였다.

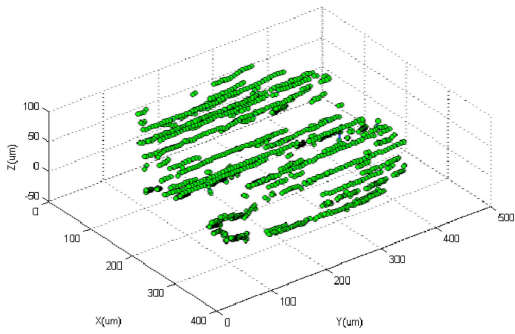
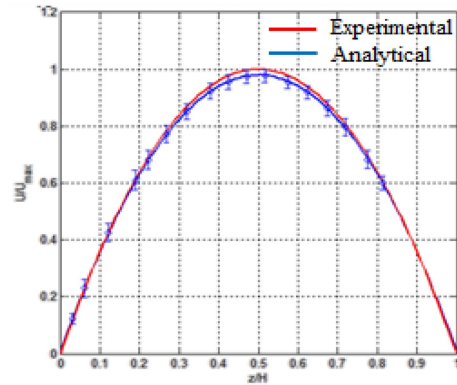


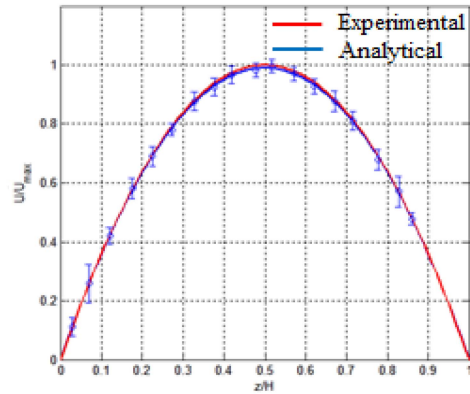
Fig. 7. Three dimensional particle tracking result in defocusing side.

Fig. 7는 디포커싱 이미지를 사용하여 입자의 3차원 위치를 추적한 결과를 나타낸 것으로 nearest neighborhood tracking 기법을 사용하였다. 근접한 두 입자간 추적 경로를 살펴볼 때 비정상적인 튜(jumping) 현상이 발견되기도 하였으나 추적알고리즘 내 유효성 평가를 통해 제거되었으며 입자의 움직임이 직관채널 유동을 잘 따름을 확인할 수 있었다. Fig. 8는 디포커싱 결과를 바탕으로 무차원화된 높이에 따라 무차원화된 평균속도 프로파일을 나타낸 것이다. 비중량이 1.04인 입자의 침강으로 인해 채널상부에서는 속도결과값은 실험적으로 얻을 수 없었으나 2차 무한평판 사이의 Poiseuille 유동에 대한 이론적인 속도프로파일과 비교할 때 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 구한 보정 곡선과 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

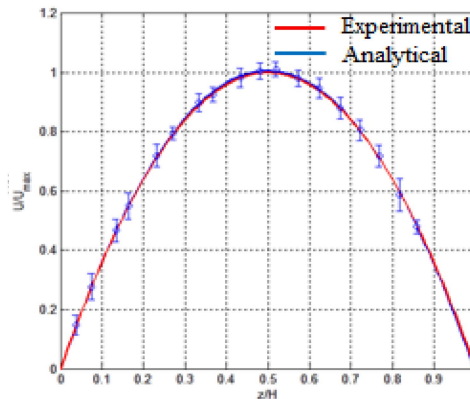
Fig. 9는 TIRFM 데이터를 바탕으로 벽면근처 영역에 나노입자의 궤적을 계산한 결과로서 디포커싱의 입자추적 결과와 같이 직선유동을 반영하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 브라운 운동에 따른 입자의 불규칙한 움직임을 확인할 수 있었으며 이는 계산된 결과에 다른 오차발생의 요인으로 작용함을 알 수 있다. Fig. 10은 TIRFM 결과를 바탕으로 벽면으로부터 유동의 속도 프로파일을 나타낸 것으로 Li와 Yoda(9)이 시도하였던 바와 같이 벽면에서의 거리를 Table 1과 같이 세 개의 구간으로 나누어 각 구간에서 구한 평균속도값을 바탕으로 1차 피팅 곡선을 나타낸 것이다. 각 유량에 따른 전단율의 측정값은 이론값과 비교할



(a) Re = 0.083



(b) Re = 0.125



(c) Re = 0.166

Fig. 8. Normalized velocity profile as a function of normalized height with 2<sup>nd</sup> order polynomial fitting.

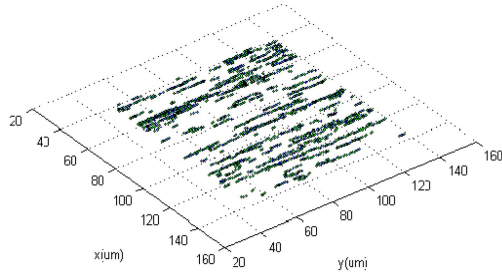


Fig. 9. Three dimensional particle tracking result in TIRFM side.

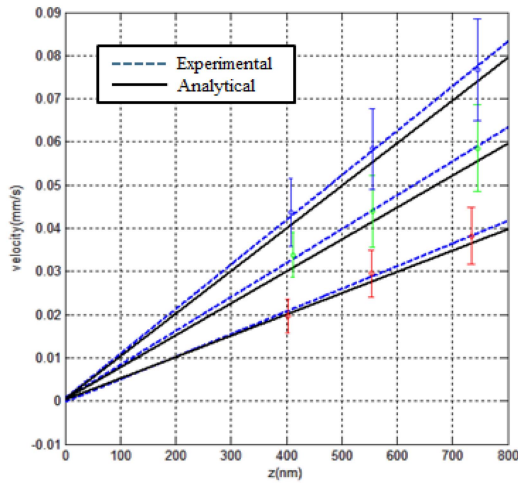


Fig. 10. Velocity profile in near wall region.

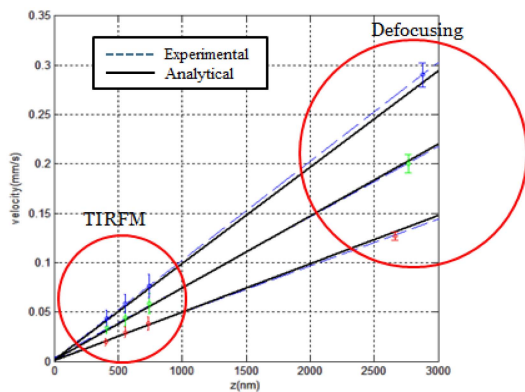


Fig. 11. Velocity profile calculated by Hybrid result.

Table 1. Layer properties

Layer	Range	$h_{center}$ (nm)	$\bar{h}$ (nm)
I	$250 \leq h < 450$	350	409
II	$450 \leq h < 650$	550	556
III	$650 \leq h < 850$	750	745

Table 2. Shear rate by TIRFM result

Re. No.	$\dot{\gamma}_{anal\_t}$ ( $s^{-1}$ )	$\dot{\gamma}_{exp\_h}$ ( $s^{-1}$ )	$\frac{ \dot{\gamma}_{exp\_t} - \dot{\gamma}_{anal\_t} }{\dot{\gamma}_{anal\_t}}$ (%)
0.083	49.3	52.4	6.3
0.125	74.0	78.5	6.1
0.166	98.7	103.3	4.7

Table 3. shear rate calculated by hybrid result

Re. No.	$\dot{\gamma}_{anal\_t}$ ( $s^{-1}$ )	$\dot{\gamma}_{exp\_h}$ ( $s^{-1}$ )	$\frac{ \dot{\gamma}_{exp\_t} - \dot{\gamma}_{anal\_t} }{\dot{\gamma}_{anal\_t}}$ (%)
0.083	49.0	47.4	3.3
0.125	72.9	71.4	2.1
0.166	97.6	100.3	2.8

때 Table 1과 같이 평균 5.7%의 오차를 가짐을 확인할 수 있다. 그러나 하이브리드 결과를 통해 계산한 전단율의 오차값은 평균 2.7%의 적은 오차를 가짐을 Table 2에서 확인할 수 있었으며 이는 개발된 하이브리드 시스템이 일반적인 Micro-PIV나 TIRFM를 이용한 Nano-PIV 보다 정확한 정량적 결과를 산출할 수 있음을 보여주는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 디포커싱 기법과 전반사 형광 현미경 기법을 통합한 하이브리드 시스템을 개발하였으며 이를 응용하여 2D 직관 마이크로 채널 내 멀티스케일의 3차원유동을 측정하였다. 측정된 실험값은 2차원 평판 내 Poiseuille유동의 이론값과 잘 일치함을 확인할 수 있었으며 이 기법은 3차원 유동의 측정과 함께 근접표면에서 거동하는 나노입자 및 센서의 3D3C 거동을 동시에 계측하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No.2010-

0000448, No.K20702001648-10E0100-07010).

### 참고문헌

- 1) Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C. D., Beebe, D. J. and Adrian, R. J., 1998, "A Particle Image Velocimetry System For Microfluidics", *Exp. Fluids*, Vol. 25, pp. 316-319.
- 2) Lindken, R., Rossi M., Grobe S. and Westerweel J., 2009, "Micro-Particle Image Velocimetry( $\mu$  PIV): Recent Developments, Applications and Guidelines", *Lab Chip*, Vol. 9, pp. 2551-2567.
- 3) Bown, M. R., MacInnes, J. M., Allen, R. W. K. and Zimmerman, W. B. J., 2006, "Three-Dimensional, Three-Component Velocity Measurements Using Stereoscopic Micro-PIV and PTV", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 2175-2185
- 4) Satake, S., Kunugi, T., Sato, K., Ito, T. and Taniguchi, J., 2005, "Three-Dimensional Flow Tracking in a Micro Channel with High Time Resolution Using Micro Digital-Holographic Particle-Tracking Velocimetry", *Opt. Rev.* Vol. 12(6), pp. 442-444.
- 5) Willert, C. E. and Gharib, M., 1992, "Three-dimensional Particle Imaging with a Single Camera", *Exp. Fluids.*, Vol. 12, pp. 353-358
- 6) Pereira, F., Gharib, M., Dabiri, D. and Modarress, D., 2000, "Defocusing Digital Particle Image Velocimetry: a 3-Component 3-Dimensional DPIV Measurement Technique, Application to Bubbly Flows", *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. 578-584.
- 7) Yoon, S.Y. and Kim, K.C., 2006, "3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in a Microvolume via the Defocusing Concept", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 17, pp. 2897-2905
- 8) Banerjee, A. and Kihm, K.D., 2004, "Three-Dimensional Tracking of Nanoparticles Using R-TIRFM (Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy Technique)", *J. Heat Transfer*, Vol. 126(4), pp. 505
- 9) Li, H. F. and Yoda, M., 2008, "Multilayer Nano-Particle Image Velocimetry (MnPIV) in Microscale Poiseuille Flows", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 19, pp.075402