

# Stereoscopic micro-PTV기법의 개발

유정환\* · 김형범†

## Development of Stereoscopic Micro-PTV Method

Cheong-Hwan Yu and Hyoung-Bum Kim

### Abstract

Micro-PIV is a well-known method for measurement of two-dimensional, two-component velocity in the microfluidic devices. Lots of the micro fluidic devices generate three-dimensional flow and 3D measurement of velocity is helpful to understand the physics of micro flow phenomena. In this study, we developed new micro 3D measurement method by applying 2-frame PTV in stereoscopic micro system.

In this study, we did the validation study of SMPTV by using the simulated flow model to verify the accuracy and the feasibility of measurement and compared with SMPIV method. The results showed that SMPTV provides better spatial resolution and measurement accuracy than SMPIV method.

**Key Words** : Stereoscopic micro-PTV(스트레오스코픽 마이크로 입자추적유속계), Stereoscopic microscope(입체 현미경), Three-dimensional velocity components(3차원 속도성분)

### 1. 서론

최근 컴퓨터 및 화상처리 기술의 발달에 힘입어 PIV 유속측정기법은 높은 정확도를 가지는 대표적인 유속측정 기법으로 활발히 사용되고 있다. 이러한 PIV 유속측정기법은 1998년 Santiago<sup>(1)</sup> 등에 의해 미세유동으로 적용되었고 이러한 micro-PIV기법은 미세유동연구의 중요한 도구가 되었다. Micro-PIV 기법은 일반적인 광학PIV 기법과는 달리 볼륨조명하에서 대물렌즈의 특성에 의한 얇은 심도를 이용하여 초점단면에서의 2차원 속도를 측정하게 된다.

최근 들어 많은 미세유동장치에서 발생하는 3차원 유동을 측정하기 위해 기존의 2차원 속도만을 측정할 수 있는 micro-PIV시스템을 확장하여 3차원 속도를 측정할 수 있는 속도측정기법들이 다양하게 발표되고 있다. Defocusing micro-PTV 측정기법<sup>(2)</sup>, 3D holographic-PTV 측정기법<sup>(3)</sup>, stereoscopic micro-PIV 측정기법<sup>(4),(5)</sup> 등이 그 대표적인 방법들이다. Defocusing micro-PTV 측정기법은 3차원 체적 내부의 3차원 속도성분을 동시에 정확히 측정할 수 있지만, 낮은 광량에서의 영상 획득이 어려운 단점이 있고, 3D holographic-PTV 측정기법도 3차원 체적 내부의 3차원 속도성분을 매우 정확히 측정할 수 있지만 시스템이 복잡하고 고가인데다 데이터 처리에 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. Stereoscopic micro-PIV 측정기법은 2차원 영상 면에서 평면에 수직인 3차원 속도성분을 측정하는 측정기법으로 defocusing micro-PTV 및 3D holographic-PTV 측정기법과 비교하여 시스템의 가격이 상대적으로 저렴하며 데

---

†경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소

E-mail : kimhb@gnu.ac.kr

\* 경상대학교 기계항공공학부 대학원

---

이더 처리시간이 짧고 실험이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 기존의 2차원 PIV 기법의 확장인 stereoscopic micro-PIV(SMPIV) 측정기법은 조사구간에서의 평균속도를 제공하기 때문에 조사구간 내에서의 속도구배가 있을 경우 정확한 측정이 어려운 단점이 있다. 그리고 평면에 수직인 속도성분을 볼륨조명하에서 대물렌즈의 특성에 의한 얇은 심도를 이용하여 측정함으로써 심도 외부에 존재하는 산란입자의 난반사 등의 영향을 받게 되고 심도 영역을 벗어나거나 새로 들어오는 입자에서의 정확한 속도측정이 어렵다. 이는 근본적으로 PIV기법이 PTV기법과 비교하여 갖는 단점으로 볼 수 있다. 본 연구에서 개발한 stereoscopic micro-PTV(SMPTV) 측정기법은 이러한 SMPIV 측정 기법과는 달리 2차원 PTV(particle tracking velocimetry) 기법인 2-프레임 PTV<sup>(6)</sup>의 확장으로 SMPIV에 비해 상대적으로 높은 공간해상도를 제공할 수 있다.

본 연구에서는 stereoscopic micro-particle tracking velocimetry(SMPTV) 기법을 개발하여 SMPTV 측정 시스템의 정확도를 검증하고 실제 유동에서 존재하는 out of focus의 영향에 대한 유동모사실험을 하였다. 그리고 SMPTV와 SMPIV 기법의 측정 정확도를 비교함으로써 SMPTV의 우수성을 확인하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 Stereoscopic micro-PTV 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 사용되어진 stereoscopic micro-PTV 시스템의 전체적인 개략도를 나타내고 있다. 유동화상을 얻기 위해 사용되어진 광원으로는 파장( $\lambda$ )이 532nm인 2-head Nd:YAG Laser(Solo III<sup>®</sup>, NewWave Co.)를 사용하였고, Zoom ratio가 6.3:1인 입체현미경((SZ-60<sup>®</sup>, Olympus Co.)의 대안렌즈경통에  $7.4 \times 7.4 \mu\text{m}$ 의 pixel size와  $1600 \times 1200$ pixel의 해상도를 가지는 CCD카메라(ES2001<sup>®</sup>, MegaPlus Co.) 2대를 연결하고, delay generator를 사용하여 레이저와 CCD카메라를 동기화하였다.

z축의 motorized stage와 x-y축의 manual stage로 구성되어진 3-axis micro stage 위에 유동모사채널을 위치시키고 유동모사실험을 수행하였다.

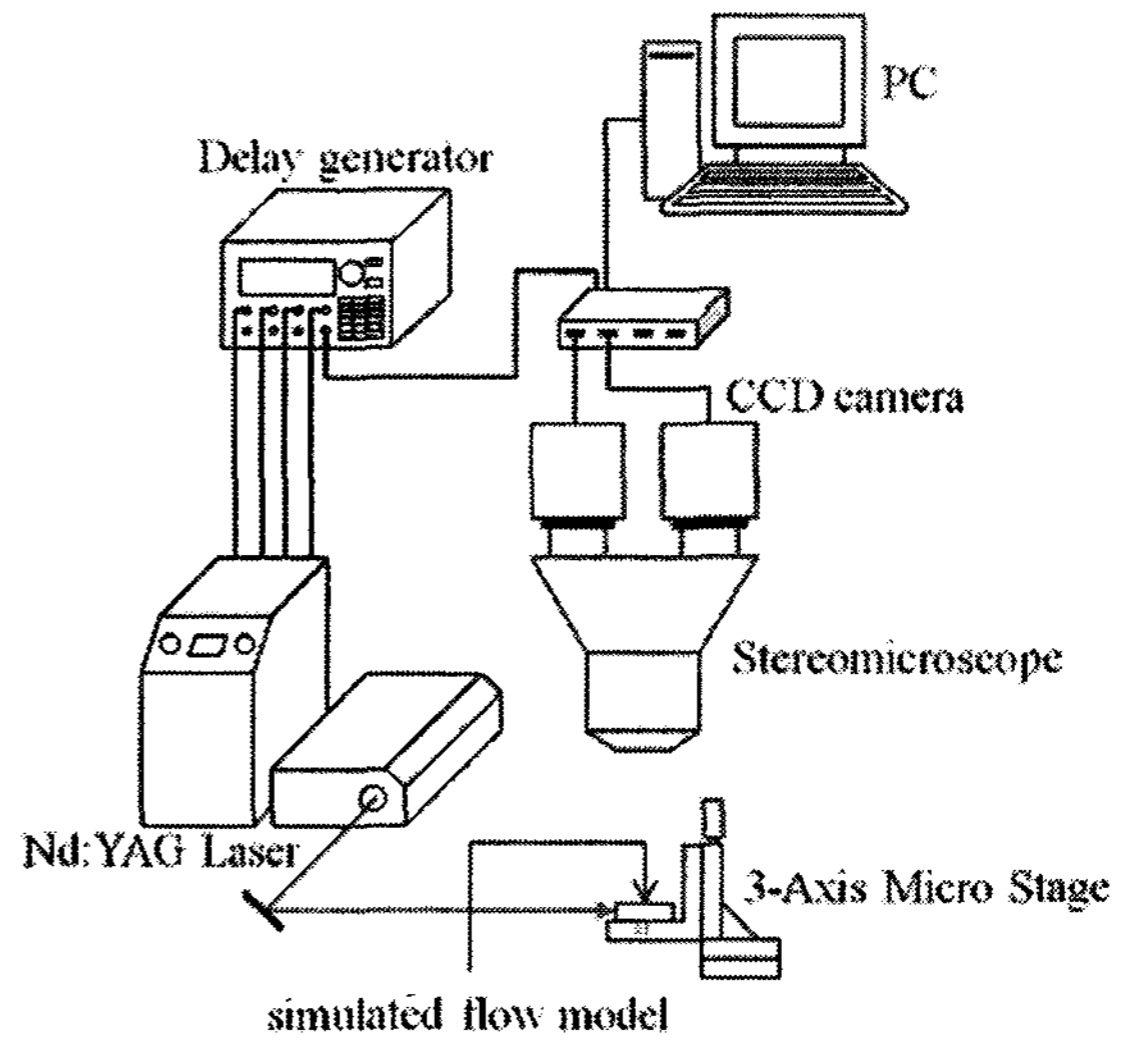


Fig. 1. Schematic diagrams of experimental setup

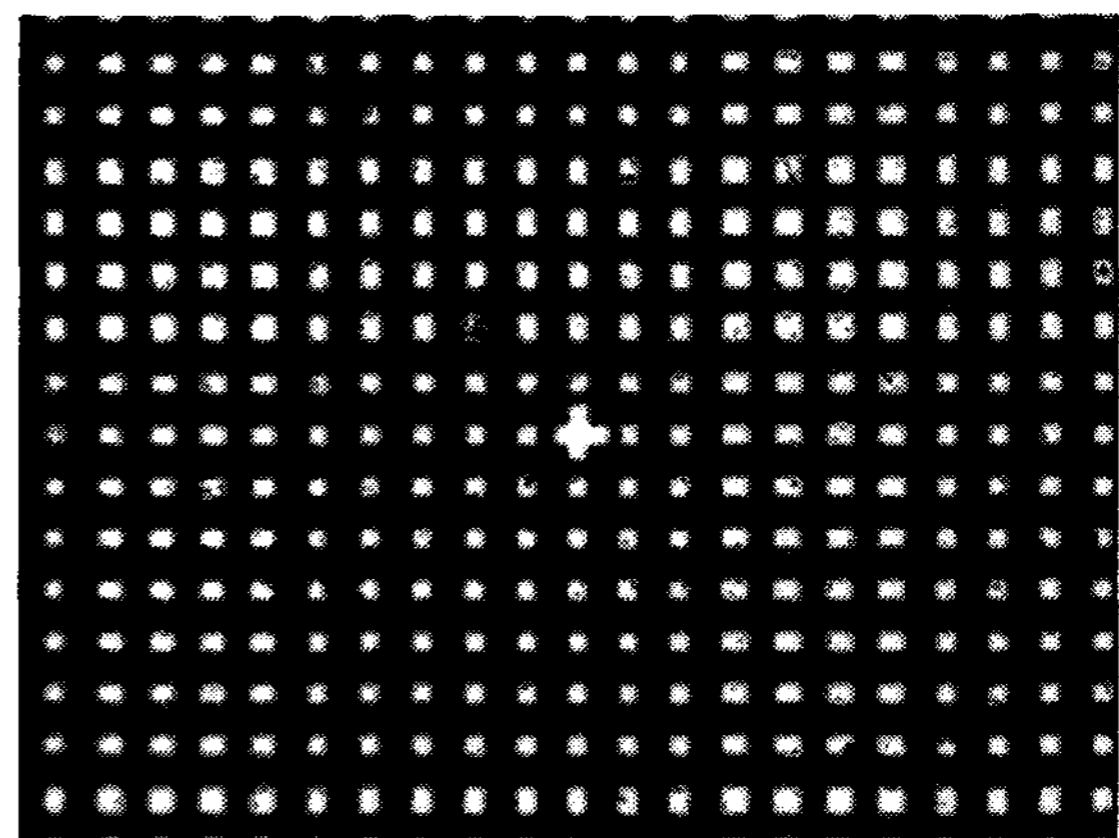


Fig. 2. Image of calibration target

### 2.2 Stereoscopic calibration

본 stereoscopic micro-PTV 시스템은 오른쪽카메라와 왼쪽카메라에 의해 획득된 2차원 영상으로부터 3D해석을 위한 사상함수를 획득하기 위해 Fig. 2와 같은 보정타겟(calibration target, MEMSCAP Corp)을 사용하였다. 보정타겟은  $75 \mu\text{m}$  간격으로  $25 \mu\text{m}$  정사각형 격자가 정렬되어 있는 형상을 가지고 있고 target의 중앙에 격자보다 큰 '十'형상의 기준점이 위치하고 있다. 사용된 입체현미경과 카메라 사이에서 이루어진 영상획득시스템에서 두 카메라사이의 각도는  $10^\circ$ 이다. 이 보정타겟의 영상은 심도 안에서 z축의 위치를 바꾸어 가며 여러 위치에서 획득하게 되고, 각각의 카메라에 의해 획득된 2차원 영상으로부터 3D해석을 위한 사상함수를 산출하였다. 본 연구에서는

0.01 $\mu\text{m}/\text{pulse}$ 의 분해능을 가지는 motorized stage(KS301-20NHD)를 사용하여 z축을 따라 초점면을 기준으로 -150 $\mu\text{m}$ 부터 150 $\mu\text{m}$ 에서 25 $\mu\text{m}$ 간격으로 이동시키면서 13개의 정지된 영상을 획득하여 사상함수를 구하였다.

### 2.3 유동모사실험

본 연구에서 SMPIV 기법과 SMPTV 기법의 측정 정확성을 검증하고 out of focus의 영향에 대한 각 측정기법의 측정 정확도를 비교하기 위해 Fig. 3(a), (b)와 같이 유동모사모형을 제작하였다. silicon oil( $n=1.4$ )에 산란입자로 직경이 10 $\mu\text{m}$ 인 silver coated hollow glass spheres를 섞은 후 슬라이드 글라스( $n=1.52$ , 1000 $\mu\text{m}$ )와 polyester 필름( $n=1.53$ , thickness=100 $\mu\text{m}$ )사이에 균일하게 분포하였고, out of focus의 영향을 확인하기 위하여 5장의 폴리에스텔 필름을 겹치고 각각의 단면에 산란입자를 분포시켜 out of focus의 영향을 관찰할 수 있도록 하였다.

제작된 유동모사모형은 micro stage를 사용하여 x축, y축은 각각 10 $\mu\text{m}$ , 그리고 z축으로 각각 10 $\mu\text{m}$ ~90 $\mu\text{m}$ 를 10 $\mu\text{m}$ 간격으로 이동시킨 후 각각의 위치에서 영상을 획득하여 세 방향에 따른 변위 측정의 정확도를 확인하였다.

## 3. 실험결과

Fig. 4는 유동모사실험에서 out of focus의 영향이 있는 경우와 없는 경우에서 x, y, z방향으로의 SMPIV와 SMPTV 기법을 사용하여 측정한 변위

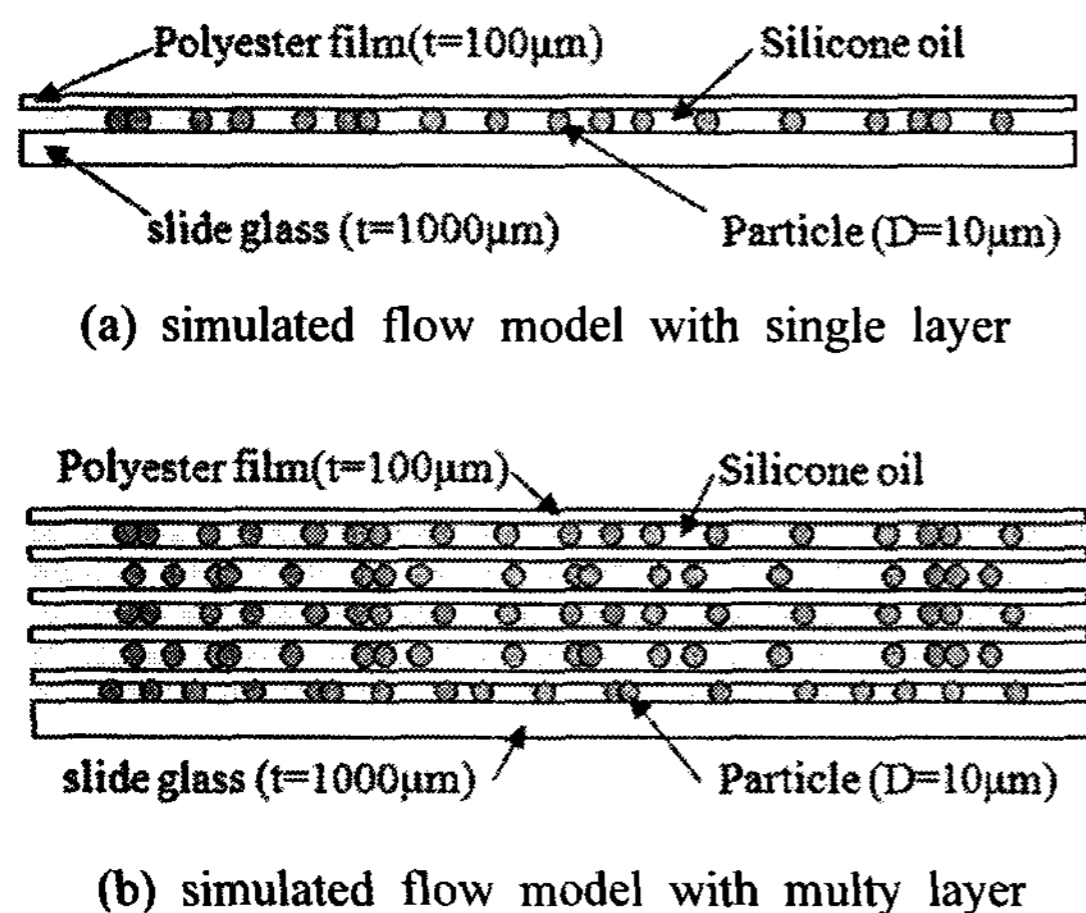


Fig. 3. The shape of simulated flow model

( $\delta_{\text{measured}}$ )와 실제 micro stage를 사용하여 입력한 변위( $\delta_{\text{displacement}}$ )사이의 오차( $\epsilon_r$ )를 선형 그래프로 보여준다. x축과 y축 변위에서는 out of focus의 영향이 있을 때와 없을 때 모두 SMPIV기법과 SMPTV기법이 1% 이하의 오차를 갖고 매우 정확하게 변위를 측정함을 알 수 있다. 그러나 z축 변위에서의 결과를 나타낸 Fig. 5의 그래프에서는 out of focus의 영향이 없을 때 SMPIV와 SMPTV 기법의 결과가 z축의 변위가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. SMPTV의 경우 70 $\mu\text{m}$  변위 이하에서는 1%이하의 낮은 오차를 보이고, 80 $\mu\text{m}$ 이

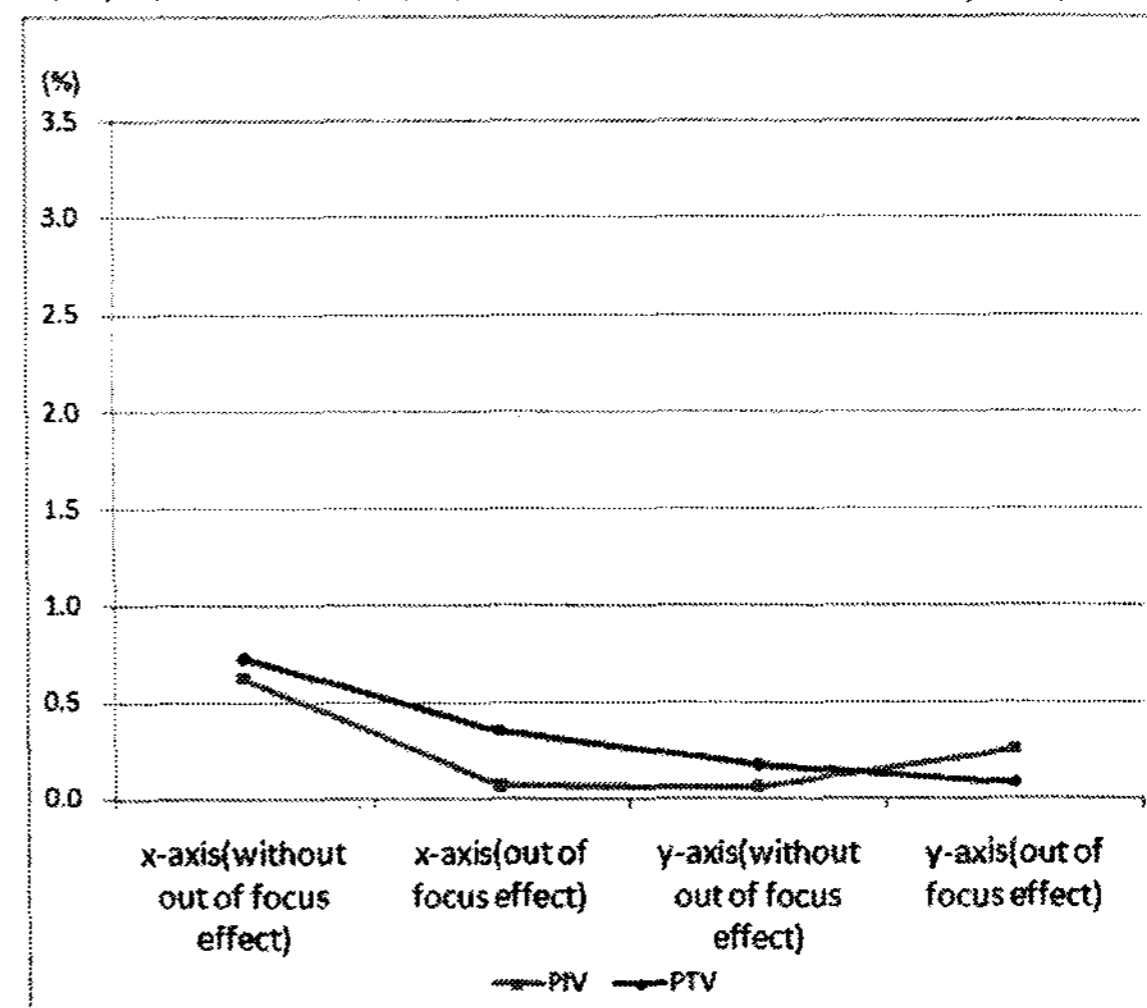


Fig. 4. The comparison of the measurement error of x-, y-axis

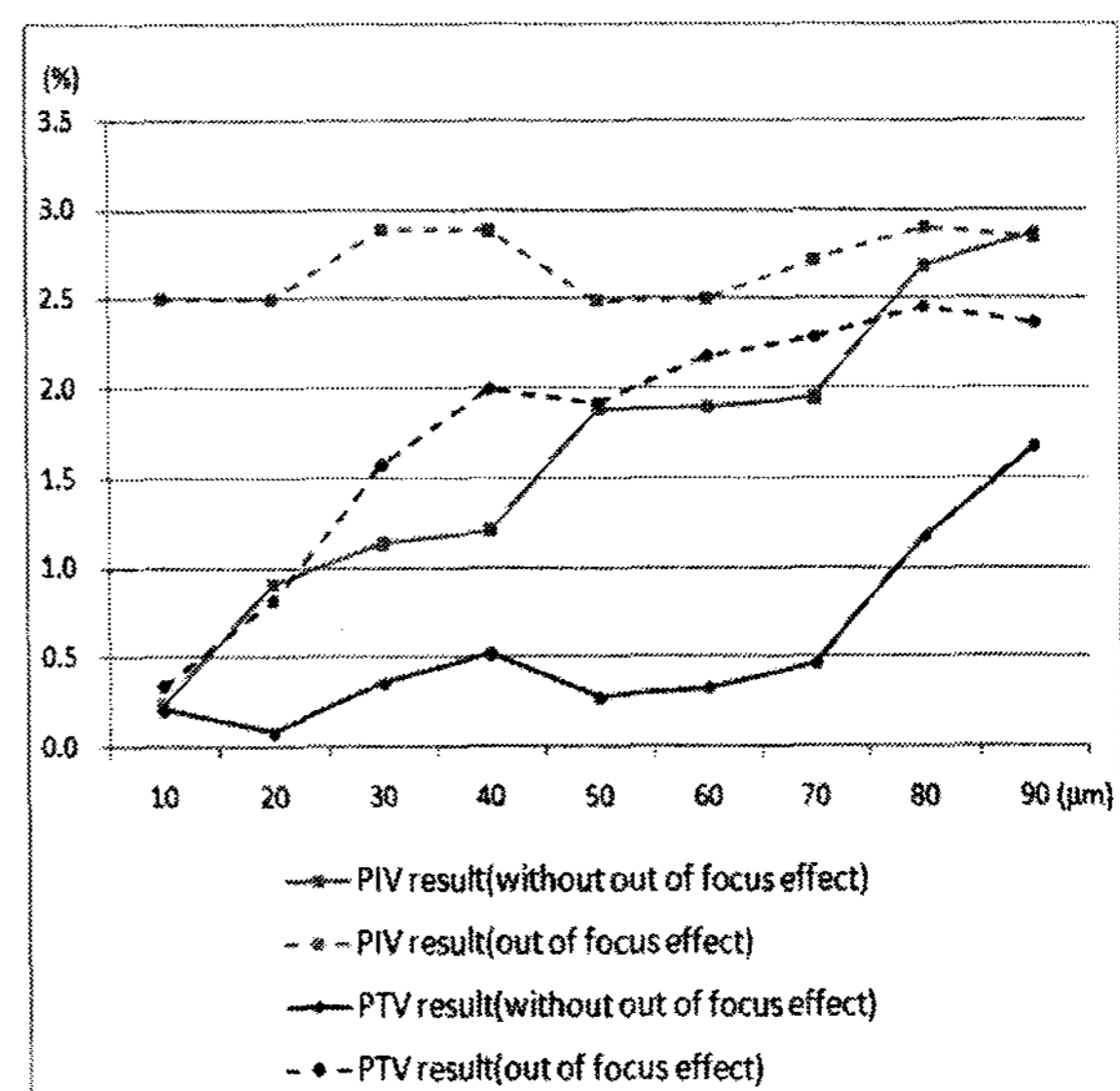
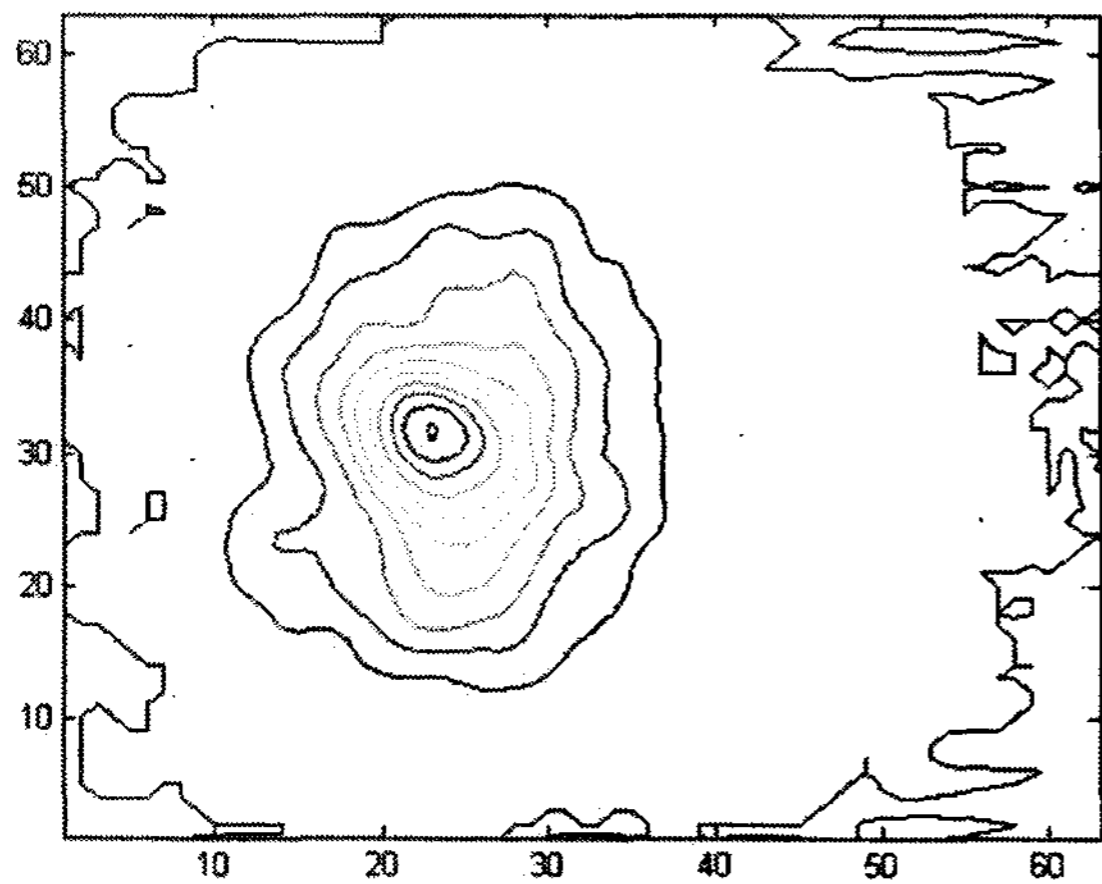
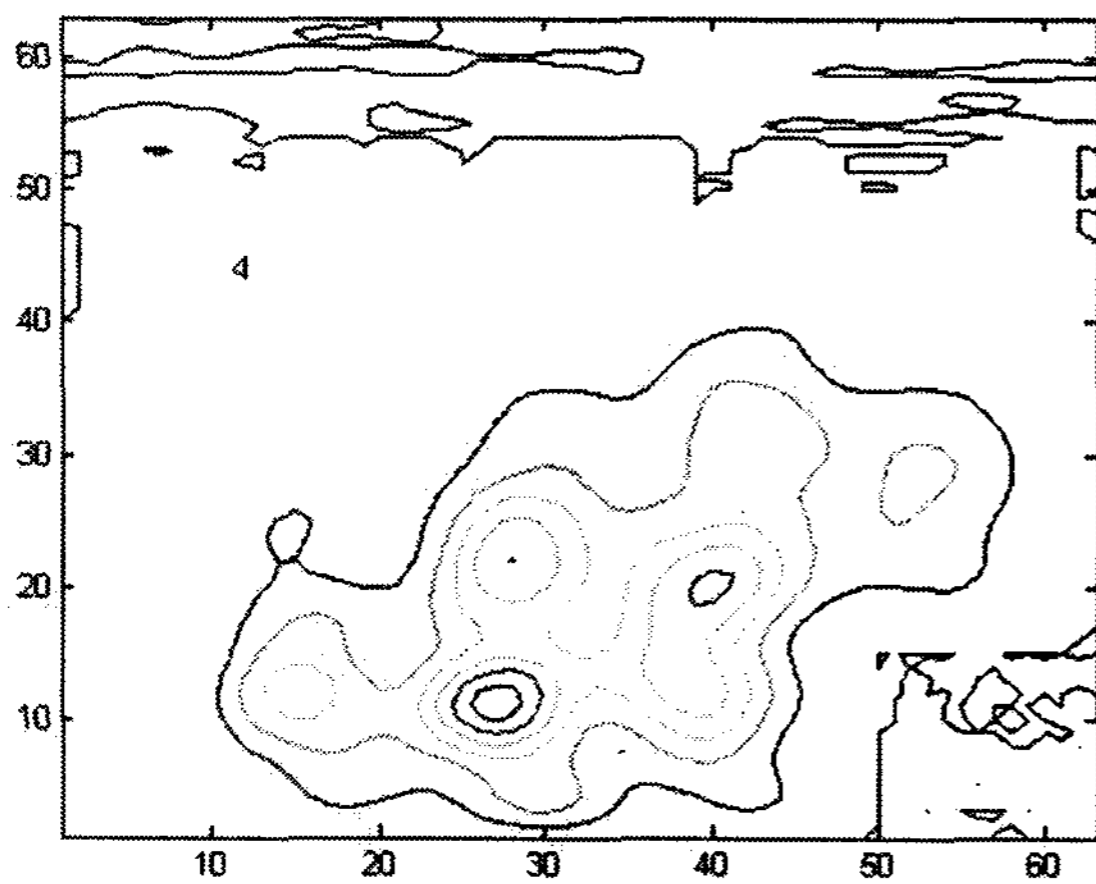


Fig. 5. The comparison of the measurement error of z-axis



(a) The correlation map without out of focus effect



(b) The correlation map with out of focus effect

Fig. 6. Correlation maps of SMPIV images

상의 변위 구간에서도 SMPIV의 결과보다 낮은 약 1.5% 정도의 오차를 보인다. 하지만 SMPIV의 경우 변위가 증가함에 따라 SMPTV와 비교하여 큰 기울기로 오차가 증가하고 80 $\mu$ m 이상의 큰 z축 변위에서는 2.5% 이상의 오차를 나타내고 있다. 이것은 z축 방향으로의 변위가 증가하면서 심도 영역의 경계를 벗어나거나 새로 들어오는 산란입자의 비율이 증가함에 따라 생기는 오차로써 실제 산란입자를 추적하는 SMPTV 기법이 SMPIV 기법에 비해 z축방향의 변위를 더욱 정확히 측정함을 보여준다. Out of focus의 영향이 있을 경우에는 SMPIV는 모든 변위에서 2% 이상의 오차를 가지고 있다. 여기서 발생하는 오차는 out of focus의 영향이 없을 때 발생하는 오차와 함께 심

도 영역 밖의 난반사된 산란입자가 획득영상의 전체영역에 분포하게 되어 z축의 변위에 상관없이 발생하는 오차이다. 그 결과 SMPIV의 경우 Fig. 6의 상호상관관계값 비교에서 보듯이 out of focus의 영향이 없는 경우와 비교하여 S/N비가 작고 정확한 sub pixel estimation이 어려움을 알 수 있다. SMPTV의 경우도 out of focus의 영향이 없는 경우에 비해 오차가 증가하지만 동일 조건에서의 SMPIV의 결과와 비교하여 낮은 오차를 보이고 있다. 즉, 20 $\mu$ m 이하의 작은 변위에서는 1% 이하의 낮은 오차를 가지며 이는 out of focus의 영향이 있어도 z축 변위가 작을 경우에는 매우 정확한 측정이 가능함을 의미한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 새로운 3차원 유동측정 기법인 SMPTV를 개발하여 모사유동실험을 수행하였다. 개발된 SMPTV기법을 기존의 SMPIV기법과 비교 검증한 결과 SMPTV기법의 성능이 SMPIV기법에 비해 out of focus의 영향 유무에 상관없이 성능이 우수함을 확인하였다.

#### 후기

본 연구는 2005년 교육인적자원 부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-005-J09901)과 과기부(과학재단)에서 지원한 시스템바이오다이나믹스연구센터의 연구지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다. 유청환군은 2단계 BK21사업 첨단기계항공고급인력양성사업단의 장학금 지원을 받았습니다.

#### 참고 문헌

- 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) Yoon, S. Y., Kim, K. C., 2006, "3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in Microvolume via the Defocusing Concept," *Meas. Sci. Technol.*, Vol.17, pp.2897-2905.

- 3) Satake, S. I., Kunugi, T., Sato, T., Ito, T., Kanamori, H. and Taniguchi, J., 2006, "Measurements of 3D Flow in a Micro-pipe via Micro Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry," *Meas. Sci. Technol.*, Vol.17, pp.1647-1651.
- 4) Brown, M. R., MacInnes, J. M., 2006, "Three-Dimensional, Three-Component Velocity Measurements using Stereoscopic Micro-PIV and PTV," *Meas. Sci. Technol.*, Vol.17, pp.2175-2185.
- 5) Hertzberg, J., Bradley, E., "Stereomicroscopic Particle Image Velocimetry," 2005, private communication.
- 6) Baek, S. J., Lee, S. J., 1995, "Development of a New 2-Frame Particle Tracking Algorithm Using Match Probability," *Trans. of the KSME*, Vol.19, pp.1741~1748