

미세제트 유동의 Stereoscopic micro-PIV 측정

유정환* · 김형범†

Stereoscopic micro-PIV measurements of jet flow

Cheong-Hwan Yu and Hyoung-Bum Kim

Abstract. Micro-PIV (particle image velocimetry) has been widely used to measure the velocity of micro flow. Although this micro-PIV method can give accurate 2D instantaneous velocity information of measurement plane, it cannot resolve the out of plane component of velocity vectors. Lots of the micro fluidic devices generate three-dimensional flow and 3D measurement of velocity is useful to understand the physics of micro flow phenomena. In this study, we constructed stereoscopic micro-PIV (SMPIV) system and applied this method to the impinging micro jet flow. The results show that this method can produce accurate 3D reconstruction of micro jet flow.

Key Words : Stereoscopic micro-PIV (스테레오스코픽 마이크로 입자영상유속계), Micro impinging jet (마이크로 충돌제트), Stereoscopic microscope (입체 현미경)

1. 서 론

1980년대에 처음 소개된 이후 PIV (particle image velocimetry) 유속측정기법은 지속적인 연구개발을 통해 높은 정확도를 갖는 대표적인 유속측정기법으로 활발히 사용되고 있다. 이러한 PIV 유속측정기법의 미세 유동 (micro flow) 으로의 적용가능성이 1998년 Santiago 등¹⁾에 의해 발표된 후 micro-PIV 기법은 미세유동 연구에 중요한 도구가 되었다. 초기의 micro-PIV 기법은 일반적인 광학 PIV 기법의 확장으로 볼륨조명하에서 대물렌즈의 특성에 의한 얇은 심도를 이용하여 초점단면에서의 2차원 속도를 측정하였다. 이러한 micro-PIV 기법은 다양한 미세유동 장치들에 적용되어 정확한 유동 측정이 가능하게 되었다. micro-PIV 기법은 기본적으로 2차원 속도장 측정기법이다. 그러나 많은 미세유동장치에서는 3차원 유동이 발생하고, 이러한 3차원 속도의 측정은 미세유동을 이해하는데 큰 도움을 줄 수 있다. 이를 위해 기존의 2차원 속도만을 측정할 수 있는

micro-PIV 시스템을 확장하여 3차원 속도장을 측정하기 위한 다양한 속도측정기법들이 최근에 활발히 소개되고 있다. Defocusing micro-PIV 측정기법²⁾, 3D holographic-PTV 측정기법³⁾, Stereo-PTV 측정기법^{4,5)} 등이 그 대표적인 방법들이다.

미세유동의 3차원 속도장을 측정할 수 있는 이러한 PIV 기법들은 나름대로의 장단점을 가지고 있고, 계속해서 성능을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 이러한 기법들 중 stereoscopic micro-PIV 기법을 구성하여 미세제트 유동에 적용하여 미세유동의 3차원 측정의 유효성을 검증하였다.

기존의 stereoscopic PIV (SPIV)는 일반적인 유체의 2-Dimensional, 3-Component 속도측정에 널리 사용되고 있다. 이 기법의 기본 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 두 대의 카메라를 사용하여 속도측정단면과 stereoscopic 구성을 한 후, 카메라의 좌표계와 실제 좌표계간의 3차원 사상함수 (mapping function)를 보정 과정을 거쳐 구한다. 동시에 두 대의 카메라로부터 2D 속도장을 획득하고, 이 속도장을 보정과정에서 구한 사상함수를 이용하여 3차원 속도성분을 계산하게 된다. 이러한 SPIV의 성능을 결정하는 중요한 변수중의 하나는 두 카메라 사이의 각도이다.

†경상대학교 기계항공공학부 항공기부품기술연구소
E-mail: kimhb@gnu.ac.kr

*경상대학교 기계항공공학부 대학원

Guezennec 등⁶⁾의 연구에 따르면 최적 각도는 45°로 보고되었으나 Lawson과 Wu⁷⁾의 연구에 의하면 일반적인 SPIV에서 카메라의 각도가 20°와 30° 사이에서 최소의 에러가 발생한다고 설명하였다. 이러한 차이는 Lawson과 Wu⁷⁾는 컴퓨터 모사실험과 실제 카메라구성에 오는 차이로 해석하고 최적의 각도는 영상획득시스템에 따라서 다르다고 주장하였다. 위의 연구결과에 의해 전통적인 SPIV에서는 20°에서 45°사이의 큰 카메라 각도가 주로 사용된다. 최근 들어 Hertzberg와 Bradley⁹⁾의 연구에 의하면 일반적인 입체(stereoscopic) 현미경에서의 대물렌즈사이의 각도는 위의 SPIV구성과 비교하여 5°~7°의 매우 작은 값을 가지나 Lawson과 Wu⁷⁾가 발표한 일반구성에서의 오차보다 상대적으로 작은 값에서 정확한 3차원 속도장 측정이 가능하다는 것이 알려졌다. 이는 입체현미경을 사용한 SPIV구성에서는 위의 일반 SPIV구성에서 예측된 오차범위가 적용되지 않음을 의미한다. 이 결과는 두 카메라사이의 각도가 작은 입체현미경을 이용해서도 SPIV구성을 통해 미세유동의 3차원 속도장 해석이 가능성을 보여준다.

본 연구에서는 stereoscopic micro-particle image velocimetry(SMPIV)시스템을 구성하여 미세유동의 3차원 측정 정확성을 정량적으로 검증하고 채널 내부에 설치된 미세충돌체트유동에 적용하여 개발된 SMPIV 기법의 응용가능성을 보였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 Stereoscopic micro-PIV 시스템

Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 stereoscopic micro-PIV 시스템의 전체적인 개략도를 나타내고 있다.

PIV 측정을 위한 광원으로 파장(λ)이 532 nm인 2-head Nd:YAG Laser(Solo III[®], NewWave Co.)를 사용하였으며, Zoom ratio가 6.3:1인 입체현미경(SZ-60[®], Olympus Co.)의 대안렌즈경통에 7.4 μm ×7.4 μm 의 pixel size와 1600×1200pixel의 해상도를 가지는 CCD 카메라(ES2001[®], MegaPlus Co.) 2대를 연결하고, delay generator를 사용하여 레이저와 CCD카메라를 동기화하여 영상을 획득하였다.

z축의 motorized stage와 x-y축의 manual stage로 구성되어진 3-axis micro stage 위에 채널을 위치시키고 연동펌프로 작동유체를 채널주입구로 흘려보냈다.

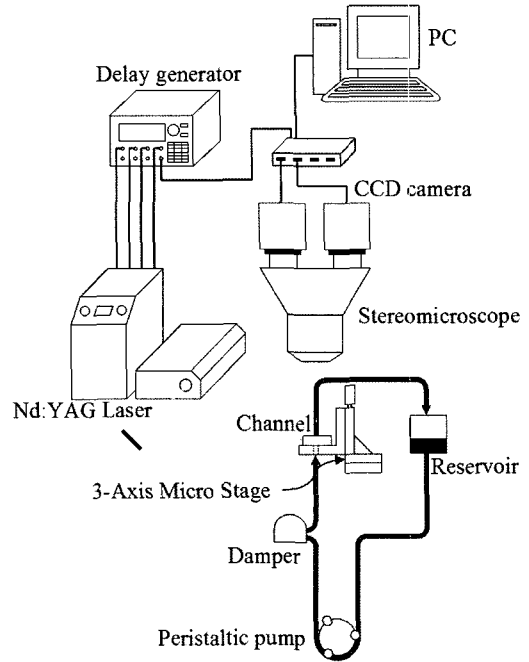


Fig. 1. Schematic diagrams of experimental setup

본 연구에 사용된 입체현미경은 상대적으로 확대배율이 낮은 모델로 이로 인해 낮은 NA값($\text{NA}=0.049$)과 큰 심도($\text{DOF}=300 \mu\text{m}$)를 갖는다. 이는 좁배율이 큰 입체현미경을 사용하면 해결할 수 있다.

2.2 Stereoscopic calibration

Stereoscopic micro-PIV에 사용하는 보정타겟(calibration target, MEMSCAP Corp)은 Fig. 2와 같이 75 μm 간격으로 25 μm 정사각형 격자가 정렬되어 있는 형상을 가지고 있고 target의 중앙에 격자보다 큰 ‘+’형상의 기준점이 위치하고 있다. 사용된 입체현미경과 카메라 사이에서 이루어진 영상획득시스템에서 두 카메라사이의 각도는 10°로 이 각에 의해 보정타겟은 심도(DOF)안에서 원근에 의해 투시된 영상(perspective image)을 나타낸다. 위 보정타겟은 오른쪽 카메라에서 획득한 보정타겟의 영상으로 영상의 좌측으로 갈수록 초점이 흐려지는 것을 확인할 수 있다. 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

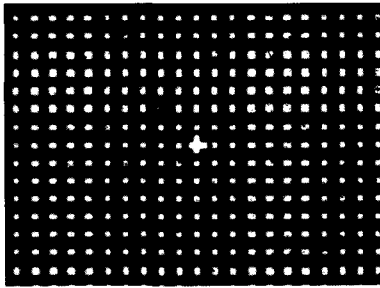


Fig. 2. Image of calibration target.

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 사상합수를 구하였다. 본 보정기법과 기존의 SPIV기법과 비교하여 그 차이는 기존의 SPIV는 얇은 레이저 평면광의 두께 내에서 보정타겟을 움직이며 보정 영상을 획득하였으나, 본 SMPIV기법에서는 심도 영역 안에서 보정타겟을 움직이며 보정영상을 획득하여 심도영역 전체에 대한 보정이 가능하도록 하였다.

2.3 stereoscopic 구성 검증

본 연구에서 보정의 정확성을 확인하기 위해 calibration channel을 제작하여 유동모사실험을 하였다. calibration channel은 Fig. 3과 같이 두 장의 슬라이드 글라스 사이에 직경이 $10\ \mu\text{m}$ 인 silver coated hollow glass spheres를 산란입자로 균일하게 분포시킨 후 micro stage를 사용하여 x축, y축 그리고 z축으로 평행 이동을 시킨 후 입자영상을 획득하고 변위장을 측정하였다. 실험 순서는 x축, y축, 그리고 z축으로 따로따로 $50\ \mu\text{m}$ 씩 이동시킨 후 영상을 획득하여 세 방향에 따른 변위측정의 정확도를 확인하였다. 유동모사의 결과는 Fig. 4에 컨투어그래프로 나타냈다. Fig. 4(a)에 있는 x축 변위에 대한 rms오차는 0.85 %이고, Fig. 4(b)의 y축 변위에 대한 rms오차는 0.56 %로 xy평면상의 변위는 매우 높은 정확도를 가지며 측정할 수 있음을 알 수

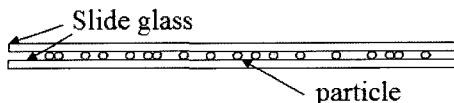
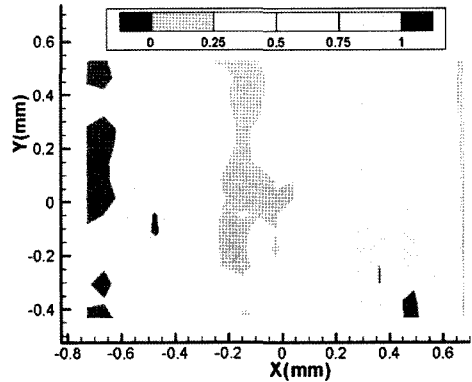
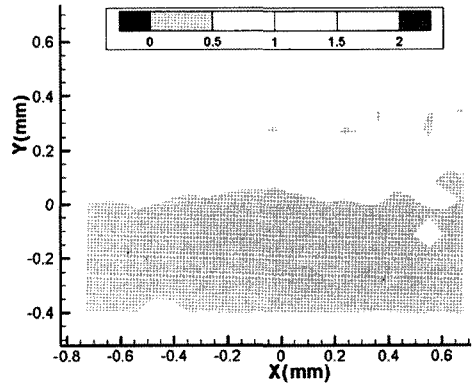


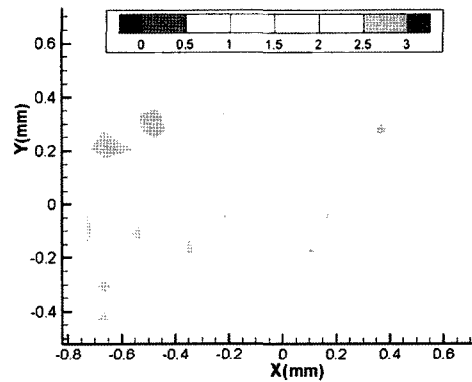
Fig. 3. Figure of calibration channel.



(a) RMS error contour of x-axis displacement



(b) RMS error contour of y-axis displacement



(c) RMS error contour of z-axis displacement

Fig. 4. Comparison of RMS error of 3D displacement measurement using SMPIV.

있다. z축으로의 rms오차는 2.17%로 x, y축과 비교하여 약 4배정도 상대적으로 큰 오차를 가졌다. 그러나 Lawson과 Wu⁷⁾의 연구와 비교하면, 두 카메라의 각도가 10°일 때 보고된 rms오차 13%와 비교하여 매우 작은 오차를 가짐을 알 수 있고 이는 Hertzberg와 Bradley⁹⁾의 연구결과와 일치함을 보여준다. Fig. 4로부터 z축 방향의 변위장은 특정 방향성을 가지지 않았으나, x축의 경우는 좌우로 y축의 경우 상하로 측정 변위값의 밴드가 나타났다. 이는 stereoscopic 보정에서 발생한 것으로 생각된다.

2.4 채널

Fig. 5는 본 연구에 사용된 챔버(chamber)로서 높이(H)가 7 mm, 길이(L)가 50 mm, 폭(W)이 13 mm이다. 재질은 아크릴이며 접합부분은 아크릴 접착제로 접합 및 sealing을 하였다. 연동펌프(Pump-77, Harvard)를 사용하여 0.2 ml/min의 일정한 유량으로 작동유체(water)를 채널바닥 중심에 가공한 노즐(d=200 μm)로부터 챔버로 흐르게 하였으며, 직경 및 평균유속을 기준으로 한 micro impinging jet의 레이놀즈수는 19이다. 챔버로 유입된 작동유체는 양쪽 벽에 있는 출구로 유체가 빠져나가도록 제작하였으며, 노즐직경을 기준으로 옆 벽면은 약 32D거리만큼 떨어져 있기 때문에 위 벽면을 제외한 벽면 효과는 충분히 무시할 수 있다. 위 벽면은 노즐로부터 35D거리만큼 떨어져 있다. PIV 측정을 위한 산란입자로 직경이 1 μm인 polystyrene microspheres (Molecular Probes, 비중: 1.05)를 사용하였다.

2.5 미세제트 유동실험

구성된 SMPIV기법의 실제 미세유동문제에서의 적용가능성을 검증하기 위하여 미세제트유동 실험을 수행하였다. 제작한 챔버를 3-axis micro stage에 고정한 후 영상의 중심에 채널의 주입구를 위치시키고 바닥면

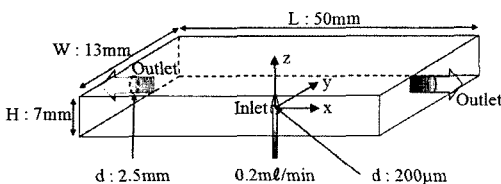


Fig. 5. Geometry of a channel

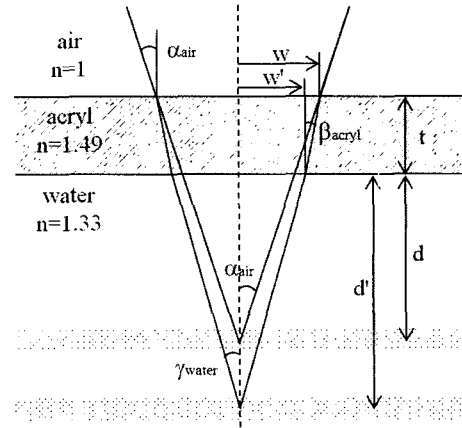


Fig. 6. Schematics of the optical conditions

에서 z축 방향의 1000 μm위쪽부터 500 μm간격으로 이동하여 11개의 평면에서 영상을 획득하였다. 상호상관관계를 이용한 SPIV기법에서는 한 장의 3차원 속도 벡터를 획득하기 위해서 오른쪽 카메라와 왼쪽 카메라에서 각각 2장의 영상을 필요로 한다. 따라서 각 측정 단면에서 두 개의 CCD카메라와 레이저조명을 delay generator를 이용하여 두 입자영상사이의 시간간격(Δt=300 μs)을 설정한 후 영상을 저장하였다.

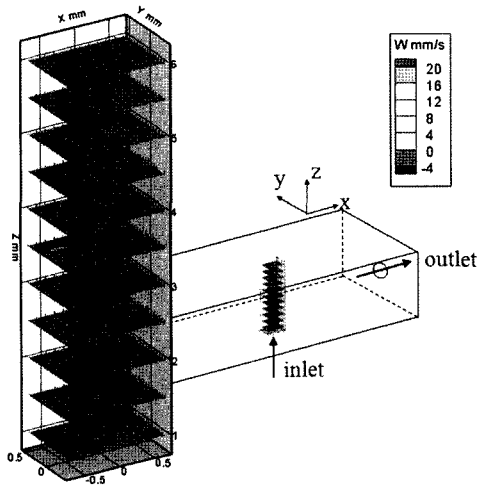
일반적으로 SPIV의 보정실험의 경우에는 작동유체 내부의 레이저 평면광 위에 보정타겟을 놓고 두 카메라의 초점면을 위치시킴으로써 굴절에 대한 왜곡을 보상할 필요가 없다. 하지만 마이크로 크기의 채널 사용에 있어서 닫힌 채널내부에 보정타겟을 위치시키는 것은 매우 어렵기 때문에 채널 외부에서 진행된 보정에 대한 보상이 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 공기(n=1)-아크릴(n=1.49)-물(n=1.33)에 대한 3가지 매체의 굴절률을 참고로 하여 다음의 식을 사용하여 보정하였다.⁸⁾

$$\sin\beta_{acryl} = \frac{\eta_{air}}{\eta_{acryl}} \sin\alpha_{air} \quad (1)$$

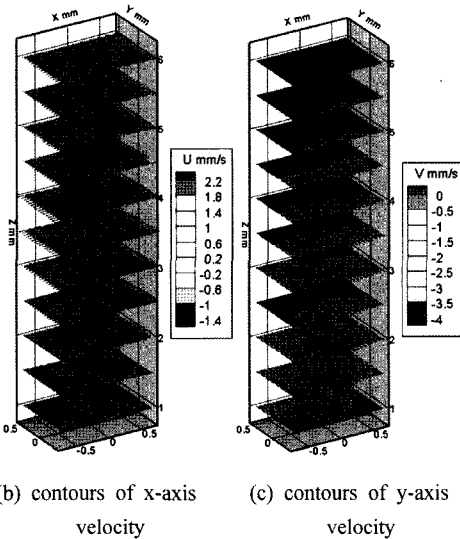
$$d' = \frac{w-t \cdot \tan\beta_{acryl}}{\tan\gamma_{water}}, \quad d = \frac{w}{\tan\alpha_{air}} - t$$

3. 실험결과

Fig. 7은 측정 구간에서 x, y, z방향으로의 u, v, w속도를 컨투어 그래프로 나타내고 있다. Fig. 7(a)는 w속



(a) contours of z-axis velocity



(b) contours of x-axis velocity

(c) contours of y-axis velocity

Fig. 7. Measurement of 3-dimensional velocities of micro jet flow using SMPIV method.

도의 크기 컨투어와 벡터그래프이다. 그림으로부터 노즐을 통과한 운동량이 큰 제트가 상부로 나아가면서 운동량 전달에 의해 속도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 (b)와 (c)는 u 와 v 속도의 컨투어 그래프와 벡터 그래프로 제트의 중심을 기준으로 노즐로부터 가까운 거리에서는 유동이 제트로 혼입되는 현상을 보여준다. 이 혼입은 제트가 채널의 상부로 이동함에 따라 크기가 줄어들고 있다. 제트가 상부로 나아가면서 벽면의 영향으로 xy 평면상으로 제트가 확산되는 형태를 보여

준다. 여기에서 제트 입구에 가까운 곳에서 u, v 속도 값이 대칭을 이루지 않고 비대칭임을 알 수 있는데, 이는 채널의 제작과정에서 입구 쪽 관로가 기울어져 제트가 정확한 수직방향이 아니라 기울어져 생기는 현상이다.

위의 결과는 구성된 SMPIV기법이 미세제트유동을 정성적으로 잘 측정함을 보여준다.

정량적인 비교를 위하여 노즐 입구로부터 z 방향으로 $500 \mu\text{m}$ 떨어진 위치에서 측정된 w 방향의 속도성분을 이용하여 유량을 계산하고, 이 유량값을 펌프에서 설정한 값과 비교하였다. 계산된 유량과 연동펌프에서 설정된 유량값(Q_{pump})의 차이(e_r)는 약 4.7%로 개발된 SMPIV기법이 정량적으로도 정확하게 속도를 측정하는 것을 의미한다.

$$Q_{\text{exp}} = \int \vec{w} A \quad (2)$$

$$e_r = \frac{Q_{\text{pump}} - Q_{\text{exp}}}{Q_{\text{pump}}} \times 100$$

4. 결 론

본 연구에서는 SMPIV시스템을 구축하여 유동모사 실험을 통해 작은 카메라사이의 각도(10°)에도 비교적 정확하게 속도를 측정할 수 있음을 확인하였다. 실제로 채널내부의 3차원 충돌제트 유동의 속도장을 측정하여 정성적 결과뿐만 아니라 정량적인 결과도 정확하게 측정할 수 있음을 확인하였다.

이 연구결과는 기존의 SPIV시스템이 입체현미경을 이용한 SMPIV시스템에도 적용이 가능함을 의미한다.

후 기

본 연구는 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국 학술진흥재단(KRF-2005-005-J09901)과 과기부(과학재단)에서 지원한 시스템바이오다이나믹스연구센터의 연구지원으로 수행되었고 이에 감사드립니다. 유청환 군은 2단계 BK21사업 첨단기계항공고급인력양성사업단의 장학금 지원을 받았습니다.

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) Yoon, S. Y., Kim, K. C., 2006, "3D Particle Position and 3D Velocity Field Measurement in Micro-volume 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) Guezennec, Y. G., Brodkey, R. S., Trigui, N. and Kent, J. C., 1994, "Algorithms for Fully Automated Three-Dimensional Particle Tracking Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol.17, pp.209-219.
- 7) Lawson, N. J., Wu, J., 1997, "Three-Dimensional Particle Image Velocimetry : Experimental Error Analysis of a Digital Angular Stereoscopic System," *Measurement Science Technology*, Vol.8, pp.1455-1464.
- 8) Wieneke, B., 2005, "Stereo-PIV using Self-Calibration on Particle Images," *Exp. Fluids*, Vol.39, pp.267-280.