

미소유체요소 내부유동의 3차원 측정 및 수치해석

이인원*·안광협**·남영석***, 이인섭****

Three-dimensional Flow Structure inside a Plastic Microfluidic Element

Inwon Lee*, Kwang Hyup An**, Young Sok Nam***, In-seop Lee****

Key words : Micro PIV(미소입자영상속도계), Microchannel(미소유로), MEMS(미소기전시스템)

Abstract

A three-dimensional inlet flow structure inside a microfluidic element has been investigated using a micro-PIV(particle image velocimetry) measurement as well as a numerical analysis. The present study employs a state-of-art micro-PIV system which consists of epi-fluorescence microscope, 620nm diameter fluorescent seed particles and an 8-bit megapixel CCD camera. For the numerical analysis, a commercial software CFD-ACE+ (V6.6) was employed for comparison with experimental data. Fixed pressure boundary condition and a 39900 structured grid system was used for numerical analysis. Velocity vector fields with a resolution of $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$ has been obtained, and the attention has been paid on the effect of varying measurement conditions of particle diameter and particle concentration on the resulting PIV results. In this study, the microfluidic elements were fabricated on plastic chips by means of MEMS processes and a subsequent molding process.

1. 서론

최근 들어 눈부신 발달을 보이고 있는 MEMS(microelectromechanical system) 기술을 응용하여 극미량의 유체흐름 및 반응을 제어하는 미소유체장치(microfluidic device)의 개발에 관심이 집중되고 있다. 미소유체장치의 목표인 고정도의 미소흐름제어 및 반응속도의 촉진을 달성하기 위해서는 그 구성 요소인 미소유체요소 내의 유동현상을 정확히 파악하는 것이 필수적이다.

미소유로 내 유동특성을 연구한 사례들은 대부분 유량 대 압력손실의 실험적 측정 및 이론적 예측에 머물러 있다[1-4]. 이러한 지금까지의 많은 연구에서 미소척도의 유동에서는 거시척도의 이론으로 예측값보다 높은 압력손실이 측정되었으며, 그 원인으로 미소유로의 거칠기 등이 논의된 바 있다[4]. 그러나 단순한 미소유체요소 내의 유량-압력손실 관계식에 대해서도 연구자들 사이에 통일된 견해가 존재하지 않으며 서로 상충되는 결과마저 제시되는 경우가 빈번하다. 이처럼 미소유체요소 내의 유동현상에 대한 보다 정밀한 실험법이 요구되는데, 현재로서는 micro-PIV의 적용이 최적이라고 판단된다.

PIV는 원래 거시척도 유동에 첨가된 입자영상의 화상처리를 통하여 정량적인 속도벡터장을 얻는 방법으로 매우 광범위하게 사용되어 왔다 [5,6]. 최근 들어 PIV로써 마이크로미터 대의 해상도를 실현하여 미소유로 내의 속도벡터장을 측정하는 연구가 보고되었다[7,8]. 이 연구에서는 직경 300nm의 epi-fluorescence 가시화 입자와 현미경을 통상적인 PIV 시스템에 접목하여 미소유동장을 계측할 수 있었다.

본 연구에서도 위와 같은 micro-PIV개발에 주목하여, 다양한 형상의 미소유체요소 내의 유동을 micro-PIV를 이용하여 측정하였다. 다양한 미소채널(microchannel) 및 미소노즐(micronozzle)에서의 micro-PIV결과를 보고한 이전의 연구결

과[9]를 토대로 하여, 본 연구에서는 micro-positioning stage를 이용하여 micro-PIV를 구성하는 현미경 대물렌즈를 $0.25\mu\text{m}$ 의 분해능으로 이송시키면서 미소채널의 횡방향으로 측정면을 이동, 평균유속의 벡터장을 3차원 공간에 대하여 조사하였다.

Micro-PIV를 이용한 미소유동장 계측의 경우, 신뢰성 있는 자료를 제시하여 주지만, 계측 영역의 한계로 전체 유동장을 동시에 계측하기 힘들고, 실험을 위한 미소채널을 제작하기 위한 시간과 비용이 많이 드는 제약조건이 따르므로 실제 미소유체요소를 제작할 때에는 수치해석 기법과 micro-PIV기법을 함께 활용하는 것이 효율적이다. 하지만 수치해석 결과의 경우 먼저 실험을 통해 타당성을 검증해야 하므로 본 연구에서는 수치해석 기법을 micro-PIV와 함께 적용하여 그 결과를 비교하였다.

2. Micro-PIV 실험장치 및 결과

2.1 Micro-PIV

Micro-PIV의 개요는 Santiago 등[7]과 Meinhart 등[8], Lee 등[9]에 상세히 기술되어 있다. Micro-PIV와 통상적인 PIV의 차이점 중 가장 큰 것은 micro-PIV에서는 마이크로 척도의 유동을 포착하기 위하여 직경 $1\mu\text{m}$ 이하, 일반적으로는 100~300nm의 추적입자를 사용하는 것이다. 연구에서는 직경 620nm의 형광입자를 사용하였는데, 방출되는 형광의 파장은 612nm이다.

본 연구에서 사용된 micro-PIV system의 개략도는 Fig. 1과 같다. 또한 Fig. 2에 본 연구에서 사용된 micro-PIV 시스템의 사진을 도시했다. 측정영역을 조사하는 입사광은 two-head Nd:YAG 레이저를 사용한다. 레이저광을 epi-fluorescent prism과 대물렌즈를 이용하여 측정체인 미소유체요소에 조사한다.

532nm의 입사광을 받은 미소유체요소 내 추적입자는 612nm의 방사광을 내는데 이 방사광만을 필터를 통하여 걸러낸 다음 Kodak Megaplug CCD camera ES1.0 을 이용하여 입자영상을 촬영한다. 이 CCD camera는 8bit 분해능에 1018×1008의 화소수를 지니고 있다. Meinhart 등[8] 에 따르면 CCD 카메라에 기록되는 입자영상의 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$d_e = [M^2 d_p^2 + d_s^2]^{1/2}, \quad d_s = 2.44M \frac{\lambda}{2NA} \quad (1)$$

여기에서 M은 대물렌즈의 배율, d_p 는 입자의 직경 (=620nm)이며 λ 는 입자에서 방출되는 빛의 파장 (=612nm), NA는 대물렌즈의 numerical aperture 이다. 본 연구에서 사용된 대물렌즈는 배율 M=50, NA=0.55이므로 위 식에서 $d_e=74.9\mu\text{m}$ 를 얻는다. 대물렌즈의 배율이 50배이므로 이 크기는 유동장에서 $1.498\mu\text{m}$ 에 해당된다. 또한 본 대물렌즈의 field of view가 약 $430\mu\text{m}$ 로서 CCD의 1pixel 은 대략 $0.425\mu\text{m}$ 이므로 입자영상의 크기는 약 3.5 pixel 에 해당된다.

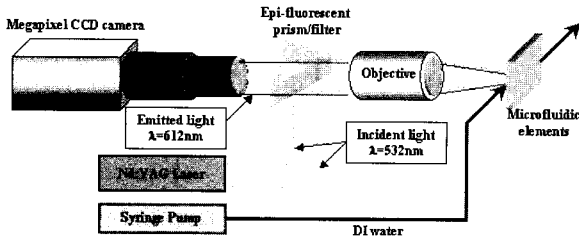


Fig. 1 Schematic diagram of micro-PIV system

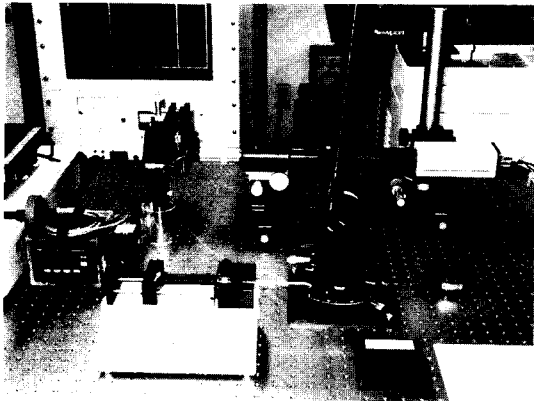


Fig. 2 Photo of the present micro-PIV system

또한 micro-PIV에 있어서 측정심도(measurement depth)는 Meinhart 등[10] 에 의하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16nd_p}{NA} + d_p \quad (2)$$

여기에서 n은 대물렌즈 주위 유체의 굴절률로서 $n=1$ 이며 이때 $\delta z_m=9.18\mu\text{m}$ 가 된다. Nd:YAG 레이저의 이송펄스에 의하여 촬영된 두 장의 연속된 입자영상을 사용하여 순간속도벡터장을 추정한다. 본 연구의 현미경의 field of view는 대략 $430\mu\text{m}$ 로서, 50% 중첩된 32×32 의 검사영역을 사용할 경우, $6.7 \times 6.7\mu\text{m}$ 의 벡터분해능을 얻을 수 있다.

2.2 미소유체요소

본 연구에서 사용된 미소유체요소는 MEMS 공정을 이용하여 제작하였다. 먼저 실리콘 기판에 Wet Etch/Deep RTE 등의 MEMS 공정으로 유체요소와는 반대인 양각의 mold를 가공한 다음 플라스틱의 일종인 PDMS (polydimethylsiloxane) 를 부어 넣어 음각의 채널 등을 제조한다. 그 후에 slide glass를 O_2 -ion bonding으로 부착하여 유체요소를 완성한다.

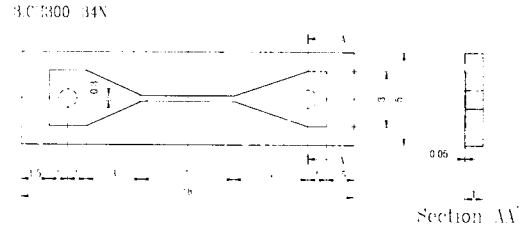


Fig. 3 Schematic drawing of the microfluidic element

미소유체요소는 Fig. 3 에 도시한 것처럼 미소평행채널과 입/출구부의 확대/축소채널로 구성된다. 채널양단의 원형 port 가 유체의 입출구가 된다. 확대/축소채널의 길이 대 폭의 비율은 Fig. 3 과 같이 각각 3:3 및 4:3 이 된다. 중앙부의 평행채널의 단면크기는 $300 \times 50\mu\text{m}$ 가 된다.

2.3 Micro-PIV 측정결과

본 연구에서 측정된 실험조건은 평균유량 $Q=5.4\mu\text{l/hr}$ 로 고정되었으며 이때 평균유속 V 는 $V=Q/A=0.10\text{ m/s}$ 에 해당된다. 이 경우 수력직경 $D_h=85.7\mu\text{m}$ 이며 수력직경과 평균유속에 의하여 정의되는 Reynolds 수 $Re=VD_h/\nu=8.6$ 으로서 층류영역에 속한다. 입자영상을 얻기 위하여 진술한 바와 같은 직경 620nm의 형광입자를 DI수(DI water) 에 부피분율 0.1%로 희석하여 사용하였다.

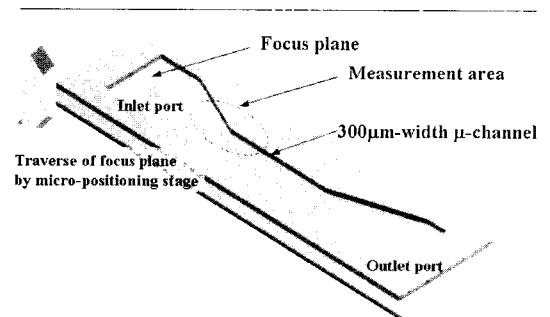


Fig. 4 Schematic diagram of focus plane traverse

측정대상인 미소유체요소를 3축 tilt stage에 위치시켜 초점평면이 채널의 중심면과 평행하도록 조절한다. 대물렌즈를 이송하여 대물렌즈와 채널 사이의 거리를 조절함으로써 초점평면이 채널의 양쪽 벽면과 일치하게 한 후 두 위치 사이의 중간 위치에 대물렌즈를 고정시키면 초점평면과 채널의 중심면과 일치한다.

본 연구에서는 대물렌즈의 초점평면을 채널의 중심면에 일치시킨 후 micro-positioning stage를 이용하여 초점평면을 $5\mu\text{m}$ 씩 이동시키면서 저장된 입자영상으로부터 2차원 속도벡터장을 계산하고 이를 종합하여 속도벡터의 3차원 분포를 조사하였다. 초점평면 이송의 개략도를 Fig. 4에 도시하였는데, 전체 측정영역은 micro-channel 의 입구를 기점으로 흐름방향

으로 $-0.1\text{mm} \leq x \leq 1.5\text{mm}$, 횡방향으로 $-0.02\text{mm} \leq z \leq 0.02\text{mm}$ 의 영역이 된다.

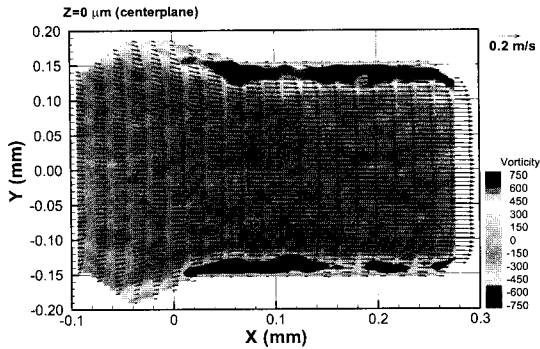


Fig. 5 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of vorticity for the center plane ($z = 0\mu\text{m}$) of the inlet region

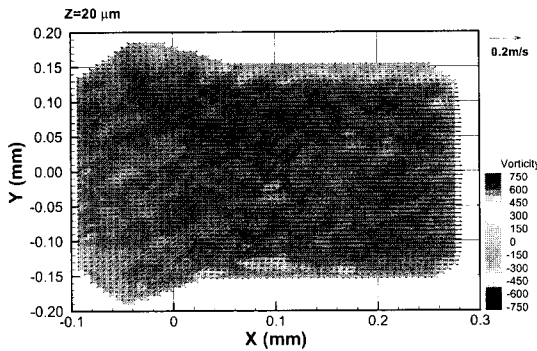


Fig. 6 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of vorticity for $z = 20\mu\text{m}$ plane of the inlet region

Fig. 5와 6에는 각각 입구영역의 중심평면 ($z=0\mu\text{m}$)과 벽면 근처 ($z=20\mu\text{m}$)에서 측정된 종합평균(Ensemble average)된 벡터도 및 와도 (vorticity)의 등고선도를 나타내었다. 중심평면에서 측정된 Fig. 5의 경우, 채널 중심부에서는 평균유속 V 와 거의 크기가 같은 유동이 존재함을 알 수 있다. 또한 비교적 벽면 근방 ($y = \pm 0.15\text{mm}$)까지 벡터가 잘 관측됨을 알 수 있다. 채널 중심평면에서 입구부를 통하여 채널로 수렴되는 유동장이 잘 관측되는데 비하여, 이와는 반대로, 벽면 근처 ($z=20\mu\text{m}$)의 유동은 매우 미미함을 알 수 있다.

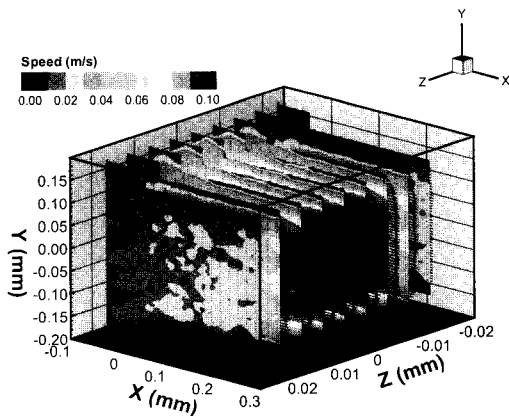


Fig. 7 Three-dimensional ensemble-averaged vector plots and contour plots of speed of the inlet region

전술한 바와 같이, micro-positioning stage를 이용하여 횡방향의 여러 평면에서 측정된 평균유속의 3차원 분포를 Fig. 7 과 Fig. 8에 나타내었다. 횡방향으로 배열된 각 측정평면마다 Fig. 5와 유사한 중심부에서 균일한 분포를 갖는 유동장이 존재하며, 그 최대속도는 각 평면마다 달라지는 것을 관찰할 수 있다.

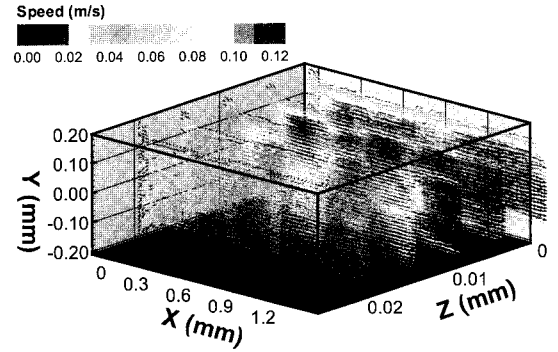


Fig. 8 Three-dimensional ensemble-averaged vector plot of the whole field

3. 수치해석 기법 및 결과

3.1 수치해석 기법

Micro-PIV 실험에 사용된 미소유체요소를 모델링 하여 수치해석 기법을 적용하였다. 수치해석 기법에는 CFD-ACE+ (V6.6)이 사용되었으며, 이 미소유동장은 $Re = 8.6$ 인 층류영역에 속하므로 기본모델인 flow모델을 이용하여 해석하였다.

격자생성을 위하여 상용코드인 CFD-GEOM을 사용하였으며 총 노드수 39900개인 정렬 격자계를 사용하였다. 그리고 본 연구의 목적이 입구영역의 해석이므로 이 영역에 격자를 밀집시켰다. 경계조건으로는 압력경계조건 (fixed pressure boundary condition)을 사용하였으며 이 때 사용한 압력 값은 실험을 통해 결정하였다.

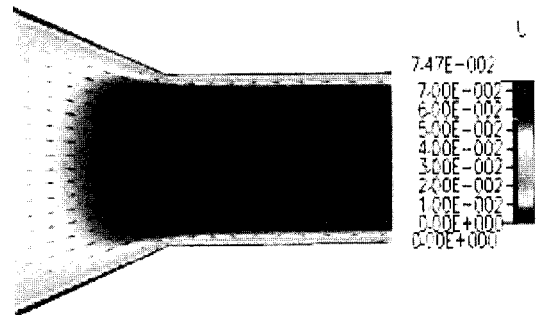


Fig. 9 Velocity vector distribution and u velocity contour for the center plane ($z = 0\mu\text{m}$) of the inlet region

3.2 수치해석 결과

본 연구에서는 미소유체요소 내의 전체 3차원 유동장을 해석하였다. 이 결과를 앞선 micro-PIV측정결과와 비교하기 위하여 입구영역의 유동장 해석결과를 살펴보았다.

Fig. 9와 10에 각각 입구영역의 중심평면 ($z=0\mu\text{m}$)과 벽면 근처 ($z=20\mu\text{m}$)에서의 속도벡터 분포 및 x 방향 속도의 등고선

도를 나타내었다. 실험결과와 유사한 유동패턴이 나타남을 확인할 수 있었으며, 채널 중심부에서와 벽면 근처에서의 유동 차이를 확연히 알 수 있다.

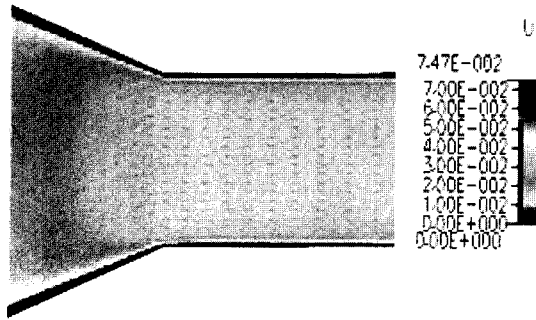


Fig. 10 Velocity vector distribution and u velocity contour for $z = 20\mu\text{m}$ plane of the inlet region

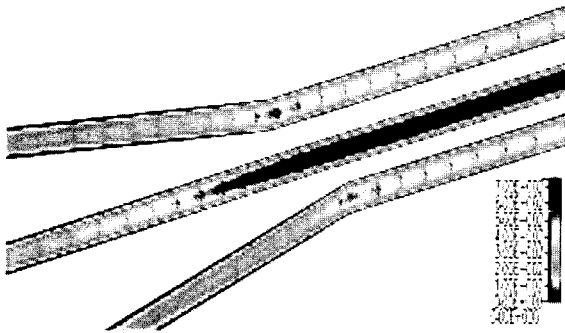


Fig. 11 Velocity vector distribution and u velocity contour for x-z planes of the inlet region

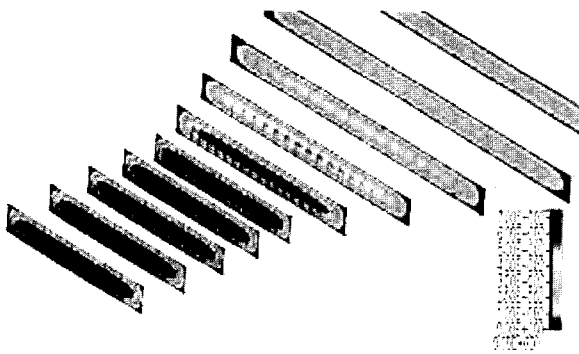


Fig. 12 Velocity vector distribution and u velocity contour for y-z planes of the inlet region

Fig. 11 및 12에 채널 입구부의 여러 평면에서의 속도벡터 분포 및 x방향 속도성분의 등고선도를 나타내었다. 이 경우 앞의 실험과 마찬가지로 각 채널의 중심부에서 최대 유속이 나옴을 확인하였고 벽 쪽으로 갈수록 유동이 미미해짐을 알 수 있다. 비록 PDMS로 제작된 미소유체요소의 정확한 조도값을 알 수 없기 때문에 수치해석 결과와 실험치를 정확히 비교할 순 없지만 두 경우 모두 속도 및 유동패턴이 유사함을 확인하였다. 이를 통하여 미소유체요소 설계 시 수치해석이 훌륭한 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

Micro-PIV 및 수치해석 기법을 적용하여 미소채널 입구부 근처의 3차원 유동장을 계측 및 해석하였다. Micro-PIV실험을 위한 미소유체요소는 MEMS 공정을 이용하여 polymer의 일종인 PDMS (polydimethylsiloxane)로 제조되었다. 본 연구에서 사용된 micro-PIV system 는 epi-fluorescence 현미경으로 구성되어 있으며 $6.7 \times 6.7 \mu\text{m}$ 의 분해능으로 최대 0.25m/s 까지의 속도벡터를 측정할 수 있었다. 계측영역은 미소유체요소의 입구부 유동이다. 수치해석에는 CFD-ACE+(V6.6)이 사용되었으며 미소채널 전체의 유동장을 해석하였다. 결과 중 입구부 유동장을 계측치와 비교하였으며, 두 경우 모두 유사한 속도 및 유동패턴을 얻었다.

참고문헌

- [1] Harley, J. and Bau, H., "Fluid Flow in Micron and Submicron Size Channels," IEEE Trans. TH0249-3, (1989), pp.25-28.
- [2] Pfahler, J. N., "Liquid transport in micron and submicron size channels," Ph. D. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Pennsylvania, (1992).
- [3] Weilin, Q., Mala, G. M. and Li, D., "Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels," Int. J. Heat Mass Transfer, vol.43, (2000), pp.354-364, 2000.
- [4] Mala, G. M. and Li, D., "Flow characteristics of water in microtubes," Int. J. Heat Fluid Flow, vol.20, (1999), pp.142-148.
- [5] Adrian, R. J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics," Ann. Rev. Fluid Mech., vol.23, (1991), pp.261-304.
- [6] 李寅燮, 加賀昭和, 山口克人, "疑似可視化畫像を用いた輝度差法逐次棄却法の定量的評價," 可視化情報學會誌, vol.19, (1999), pp.57-63.
- [7] Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C.D., Beebe, D. J. and Adrian, R. J., "A particle image velocimetry system for microfluidic," Exp. Fluids, vol.25, (1998), pp.316-319.
- [8] Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., "PIV measurements of a microchannel flow," Exp. Fluids, vol.27, (1999), pp.414-419.
- [9] Lee, I., Choi, J., and Lee, I. S., "Measurement of a microchannel flow using a micro-PIV," Proceeding of Korea-Japan Joint Seminar on Particle Image Velocimetry, (2001), pp.44-52.
- [10] Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Gray, M. H. B., "Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry," Meas. Sci. Tech., vol.11, pp.809-814, 2000
- [11] CFD-ACE+ Theory Manual, version 6.6, CFD Research Corporation, Huntsville, Alabama, January 2001, (<http://www.cfdrc.com>)