

# 플라스틱 미소유체요소 내부유동의 PIV 측정

이 인원\* · 최 제호\*\* · 이 인섭\*\*\*

## PIV measurements of a microfluidic elements fabricated in a plastic chip

Inwon Lee, Jayho Choi and In-Seop Lee

**Key Words :** Micro-PIV (미소입자영상속도계), MEMS (미소기전시스템), microfluidic elements(미소유체요소), microchannel (미소유로), micronozzle (미소노즐)

### Abstract

A micro-PIV (particle image velocimetry) measurement has been conducted to investigate flow fields in such microfluidic devices as microchannels and micronozzle. 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. 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. Flow fields in a variety of microchannels as well as micronozzle have been investigated.

### 기호설명

- A : 단면적  
 $D_h$  : 수력직경 (hydraulic diameter)  
 $f_D$  : Darcy friction factor  
 Q : 유량  
 $Re$  : Reynolds number ( $=VD_h/\nu$ )  
 V : 평균속도 ( $=Q/A$ )

### 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. 대표적인 미소유체장치의 예로서는 미소냉각기, 미소열교환기, 미소엔진, 미소펌프 그리고 DNA chip 등을 들 수 있는데 이들 장치들은 흐름의 제어를 위하여 미소밸브와 미소유로 등의 유체

요소를 공통적으로 구비하고 있다. 따라서 미소유체장치의 목표인 고정도의 미소흐름제어 및 반응속도의 측진을 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<sup>(1-4)</sup>. 이러한 지금까지의 많은 연구에서 미소척도의 유동에서는 거시척도의 이론으로 예측값보다 높은 압력손실이 측정되었으며, 그 원인으로 미소유로의 거칠기 등이 논의된 바 있다<sup>(4)</sup>. 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<sup>(5,6)</sup>. 최근 들어 PIV 로써 마이크로미터 대의 해상도를

\* [inwonlee@lge.com](mailto:inwonlee@lge.com) LG 전자 디지털어플라이언스(연)

\*\* [jayho@lge.com](mailto:jayho@lge.com) LG 전자 디지털어플라이언스(연)

\*\*\* [islee@lge.com](mailto:islee@lge.com) LG 전자 디지털어플라이언스(연)

실현하여 미소유로 내의 속도벡터 장을 측정할 연구가 보고되었다<sup>(7,8)</sup>. 이 연구에서는 직경 300nm의 epi-fluorescence 가시화 입자와 현미경을 통상적인 PIV 시스템에 접목하여 미소유동장을 측정할 수 있었다.

본 연구에서도 위와 같은 micro-PIV 개발에 주목하여, 다양한 형상의 미소유체요소 내의 유동을 micro-PIV 를 이용하여 측정하였다. 미소유체요소는 미소채널(microchannel)과 미소노즐(micronozzle)이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 Micro-PIV

Micro-PIV 의 개요는 Santiago 등<sup>(7)</sup> 과 Meinhart 등<sup>(8)</sup> 에 상세히 기술되어 있다. Micro-PIV 와 통상적인 PIV 의 차이점 중 가장 큰 것은 micro-PIV 에서는 마이크로 척도의 유동을 포착하기 위하여 직경 1 $\mu\text{m}$  이하, 일반적으로는 100~300nm 의 추적 입자를 사용하는 것이다. 이 경우 통상 PIV 에서 사용되는 광원의 파장 532nm 이 입자직경보다 커지기 때문에 종래 큰 입자에 대해 적용되던 탄성산란 (elastic scattering) 에 의하여 입자영상을 얻기 힘들어진다. 따라서 Santiago 등<sup>(7)</sup> 은 비탄성산란의 일종인 epi-fluorescence 를 이용할 것을 제안한 것이다. 이 방법은 형광안료를 도포한 polystyrene 입자를 사용하는 것이다. 본 연구에서는 직경 620nm 의 형광입자를 사용하였는데, 방출되는 형광의 파장은 612nm 이다.

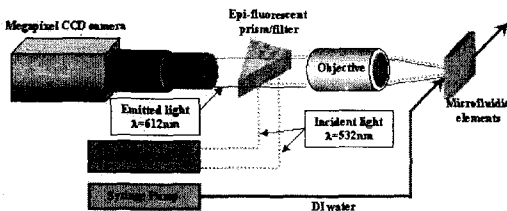


Fig. 1 Schematic diagram of micro-PIV system

본 연구에서 사용된 micro-PIV system 의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 또한 Fig. 2 에 본 연구에서 사용된 micro-PIV 시스템의 사진을 도시했다. 측정영역을 조사하는 입사광은 two-head Nd:YAG 레이저를 사용한다. 레이저광을 epi-fluorescent prism 과 대물렌즈를 이용하여 측정체인 미소유체요소에 조사한다. 통상적인 PIV 에서 sheet beam 을 이용하는

것과는 달리 micro-PIV 에서는 대상체에 체적조명 (volume lighting)을 실시하는데 이는 마이크론 단위의 시트 폭을 만들기가 사실상 불가능하기 때문이다. 그 대신, 대물렌즈의 초점심도(depth of focus)에 의하여 현미경으로 관찰되는 영역은 2 차원의 평면으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 Mitutoyo 의 M Plan APO 50X 대물렌즈를 사용하여 0.9 $\mu\text{m}$ 의 초점심도를 확보하였다.

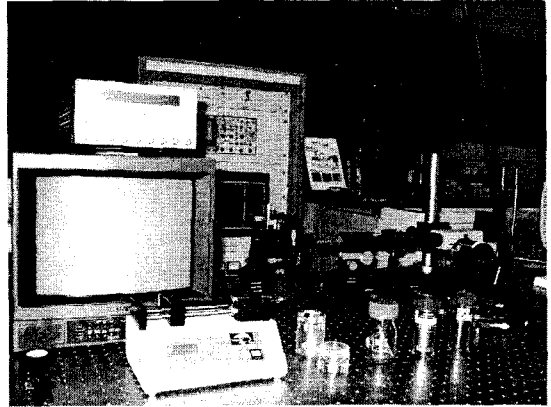


Fig. 2 Photo of the present micro-PIV system

532nm 의 입사광을 받은 미소유체요소 내 추적 입자는 612nm 의 방사광을 내는데 이 방사광만을 필터를 통하여 걸러낸 다음 Kodak Megaplug CCD camera ES1.0 을 이용하여 입자영상을 촬영한다. 이 CCD camera 는 8bit 분해능에 1018 $\times$ 1008 의 화소수를 지니고 있다. Meinhart 등<sup>(8)</sup> 에 따르면 CCD 카메라에 기록되는 입자영상의 크기는 다음과 같이 주어진다.

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

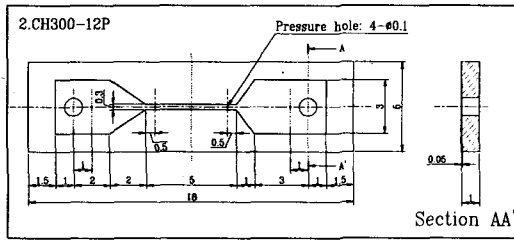
여기에서 M 은 대물렌즈의 배율,  $d_p$  는 입자의 직경 (=620nm) 이며  $\lambda$  는 입자에서 방출되는 빛의 파장 (=612nm), NA 는 대물렌즈의 numerical aperture 이다. 본 연구에서 사용된 대물렌즈는 배율  $M=50$ ,  $NA=0.55$  이므로 위 식에서  $d_e=74.9\mu\text{m}$  를 얻는다. 대물렌즈의 배율이 50 배이므로 이 크기는 유동장에서 1.498 $\mu\text{m}$  에 해당된다. 또한 본 대물렌즈의 field of view 가 약 430 $\mu\text{m}$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

또한 micro-PIV 에 있어서 측정심도(measurement depth) 는 Meinhart 등<sup>(9)</sup>에 의하면 다음과 같이 구할 수 있다.

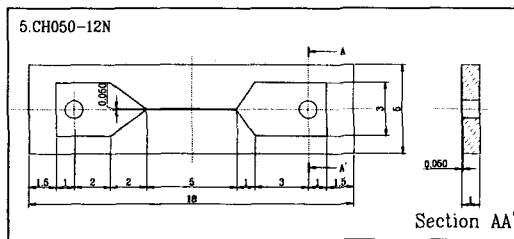
$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{NA^2} + \frac{2.16nd_p}{NA} + d_p \quad (2)$$

여기에서  $n$  은 대물렌즈 주위 유체의 굴절률로서  $n=1$  이며 이때  $\delta z_m=9.18\mu\text{m}$  가 된다.

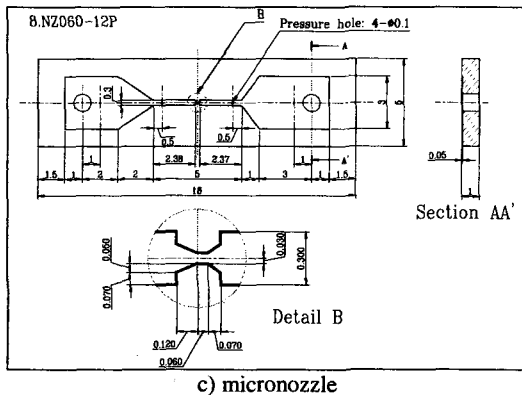
Nd:YAG 레이저의 이중펄스에 의하여 촬영된 두 장의 연속된 입자영상을 사용하여 순간속도벡터장을 추정한다. 본 연구에서 사용한 현미경의 field of view 는 대략  $430\mu\text{m}$  로서, 50% 중첩된  $32\times 32$  의 검사영역을 사용할 경우,  $6.7\times 6.7\mu\text{m}$  의 벡터분해능을 얻을 수 있다.



a)  $300\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$  microchannel



b)  $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$  microchannel



c) micronozzle

Fig. 3 Schematic drawing of the present microfluidic elements

## 2.2 미소유체요소

본 연구에서 사용된 미소유체요소는 MEMS 공정을 이용하여 제작하였다. 먼저 실리콘 기판에

Wet Etch/Deep RIE 등의 MEMS 공정으로 유체요소와는 반대인 양각의 mold 를 가공한 다음 플라스틱의 일종인 PDMS (polydimethylsiloxane) 를 부어 넣어 음각의 채널 등을 제조한다. 그 후에 slide glass 를  $\text{O}_2$ -ion bonding 으로 부착하여 유체요소를 완성한다.

이들 미소유체요소는 Fig. 3 a)-b) 에 도시한 것처럼 미소평행채널과 입/출구부의 확대/축소채널 그리고 Fig. 3 c)와 같은 미소노즐로 구분된다. 채널양단의 원형 port 가 유체의 입출구가 된다. 유체는 DI 수(Deionized water) 를 사용하였는데 Fig. 1 에서와 같이 syringe pump 를 이용하여 최대  $40\mu\text{L/s}$  의 유량으로 유체를 흘려주게 된다. 확대/축소채널의 길이 대 폭의 비율은 Fig. 3 과 같이 각각 1:3, 2:3, 3:3 및 4:3 이 된다. 중앙부의 평행채널은 두 가지로 제작하였는데 단면크기는 각각  $300\times 50\mu\text{m}$ ,  $50\times 50\mu\text{m}$  가 된다. Fig. 3 b)에 나타낸 미소노즐은  $300\times 50\mu\text{m}$  의 평행채널 내부에  $60\times 50\mu\text{m}$  의 개구부를 갖는 노즐을 설치하였다.

## 3. 연구결과

본 연구에서 측정된 실험조건은 6 가지로서 미소채널의 폭과 유량을 변화시켰는데 자세한 조건을 Table. 1 에 정리하였다. syringe pump 를 이용하여 유량  $Q$  를 Table. 1 과 같이 조절하였으며 이때 평균유속  $V$  는  $V=Q/A$  로 주어진다.

Case #	미소 유체요소	폭 [ $\mu\text{m}$ ]	깊이 [ $\mu\text{m}$ ]	$D_h$ [ $\mu\text{m}$ ]	유량 $Q$ [ $\mu\text{L/hr}$ ]	$V$ [ $\text{m/s}$ ]
1	미소채널	300	50	85.7	2.7	0.05
2	미소채널	300	50	85.7	5.4	0.10
3	미소채널	300	50	85.7	10.8	0.20
4	미소채널	50	50	50	0.45	0.05
5	미소채널	50	50	50	0.90	0.10
6	미소노즐	300	50		2.7	

Table. 1 Measurement conditions

측정대상인 미소유체요소를 3 축 tilt stage 에 위치시켜 초점평면이 채널의 중심면과 평행하도록 조절한다. 대물렌즈를 이동하여 대물렌즈와 채널 사이의 거리를 조절함으로써 초점평면이 채널의 양쪽 벽면과 일치하게 한 후 두 위치 사이의 중간 위치에 대물렌즈를 고정시키면 이때 초점평면과 채널의 중심면과 일치한다. 입자영상을 얻기 위하여 전술한 바와 같은 직경  $620\text{nm}$  의 형광입자를

DI 수(DI water) 에 부피분율 0.1%로 희석하여 사용하였다.

Fig. 4 및 Fig. 5 는 각각 Case #1 과 Case #3 에서의 총합평균 (Ensemble average) 된 벡터도 및 와도 (vorticity)의 등고선도를 나타낸다. 각각의 경우에서 채널 중심부에서는 평균유속  $V$  와 거의 크기가 같은 유동이 존재함을 알 수 있다. 또한 비교적 벽면 근방까지 벡터가 잘 관측됨을 알 수 있다.

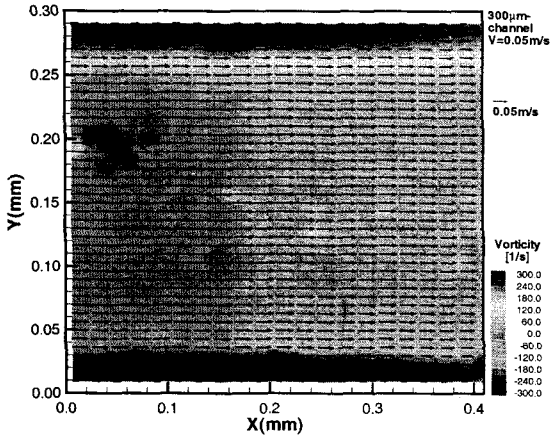


Fig. 4 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of vorticity for Case #1

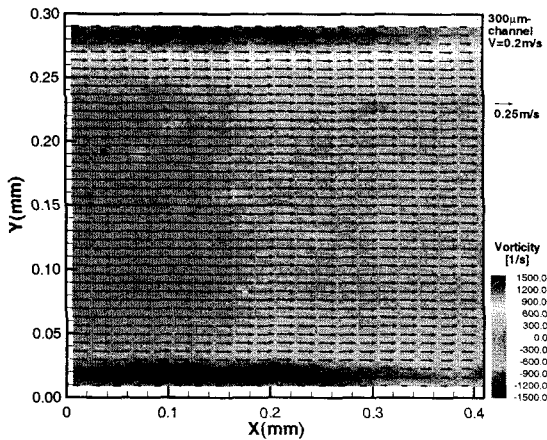


Fig. 5 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of vorticity for Case #3

폭  $50\mu\text{m}$  의 microchannel 인 Case #4, #5 에서의 벡터도 및 유속의 등고선도를 Fig. 6 에 도시하였다. 이 경우에 있어서도 대물렌즈의 field of view 는  $430\mu\text{m}$  으로 공간분해능은 앞서의 경우와 마찬가지로

가지이기 때문에 폭 방향인  $y$  방향의 분해능은  $6.7\mu\text{m}$  로  $50\mu\text{m}$  의 채널 폭에 적용하기에는 제한적인 결과임을 알 수 있다. 그러나 이 경우에서도 중심부의 유속이 평균유속과 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 포물선형 유속분포를 확인할 수 있는데 이는 폭  $300\mu\text{m}$  인 앞서의 경우와는 달리 유동이 완전발달 되었음을 알 수 있다.

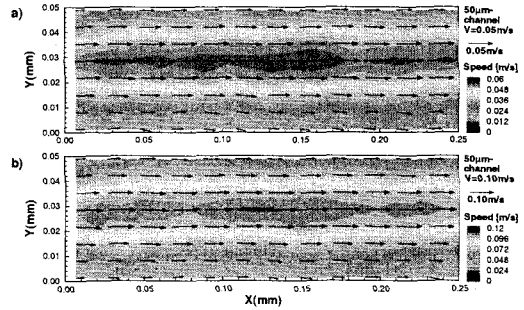


Fig. 6 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of vorticity for Case #4 and #5

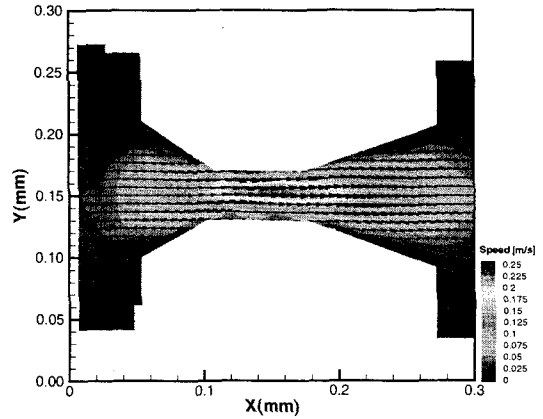


Fig. 7 Ensemble-averaged vector plot and contour plot of flow speed for Case #6

Fig. 7 은 Case #6 인 미소노즐에 있어서의 총합 평균된 벡터도 및 유속의 등고선도이다. 이 노즐의 면적비는 6:1 로서 노즐의 목 부위에서 상당한 가속이 일어나는데 본 micro-PIV 의 측정결과 그러한 현상이 잘 관측되고 있다.

Fig. 8 및 9 는 Case #1-#5 에서 얻어진 총합평균된 벡터도를 흐름방향으로 평균하여 얻어진 흐름 방향 속도성분의 분포도이다. Fig. 8 의 경우에는 대칭적인 속도분포를 확인할 수 있으며 Fig. 9 에서는 공간분해능이 제한적이거나 포물선형의 분포가 잘 나타나 있다.

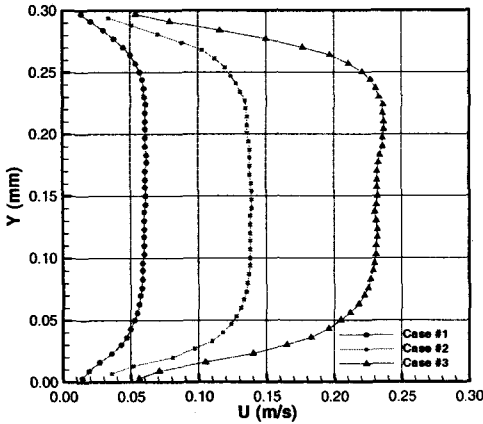


Fig. 8 Streamwise-averaged streamwise velocity profile for 300µm×50µm channel

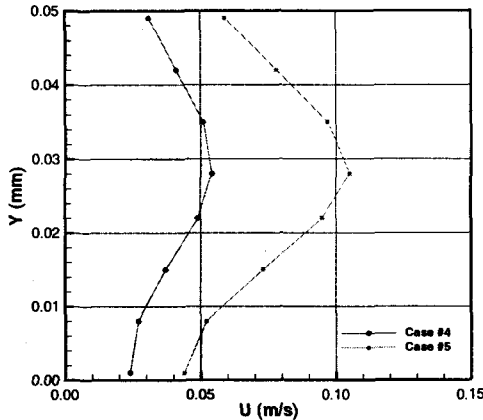


Fig. 9 Streamwise-averaged streamwise velocity profile for 50µm×50µm channel

#### 4. 결론

미소유체장치 (microfluidic device)의 구성요소가 되는 미소채널 및 미소노즐 내의 유동장을 micro-PIV 를 이용하여 계측하였다. 미소유체요소는 MEMS 공정을 이용하여 polymer 의 일종인 PDMS (polydimethylsiloxane)으로 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. 속도측정은 폭 300µm 및 50µm 의 미소채널과 미소노즐에서 수행되었으며 미소유체요소 내 유동현상을 이해할 수 있는 결과를 획득하였다.

- (1) Harley, J. and Bau, H., 1989, "Fluid Flow in Micron and Submicron Size Channels," IEEE Trans. THO249-3, pp.25-28
- (2) Pfahler, J. N., 1992, "Liquid transport in micron and submicron size channels," Ph. D. thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Pennsylvania
- (3) Weilin, Q., Mala, G. M. and Li, D., 2000, "Pressure-driven water flows in trapezoidal silicon microchannels," Int. J. Heat Mass Transfer, vol.43, pp.354-364
- (4) Mala, G. M. and Li, D., 1999, "Flow characteristics of water in microtubes," Int. J. Heat Fluid Flow, vol.20, pp.142-148
- (5) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics," Ann. Rev. Fluid Mech., vol.23, pp.261-304
- (6) 李寅燮, 加賀昭和, 山口克人, 1999, "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, pp.57-63
- (7) 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
- (8) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, "PIV measurements of a microchannel flow," Exp. Fluids, vol.27, pp.414-419
- (9) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Gray, M. H. B., 2000, "Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry," Meas. Sci. Tech., vol.11, pp.809-814