

# 원형 마이크로채널 내의 입자가 부유된 유동의 특성

김영원\* · 진송완\*\* · 유정열†

## Characteristics of Particle Laden Flows in Circular Microchannels

Y.W. Kim, S.W. Jin and J.Y. Yoo

### Abstract

Experimental study has been conducted to evaluate characteristics of particle laden flows at the ratio of channel diameter to particle diameter ( $B = 14.9, 21.6$  and  $55$ ). Particle velocities and radial concentrations are obtained using a microscope, Nd:YAG laser and cooled CCD camera. Results show that there are relative velocities between the fluid and the particles at  $B = 14.9$ . It is also observed that the particles are accumulated at  $r = 0.5 \sim 0.82R$ , with  $R$  being the tube radius, and particle migration occurs at small Reynolds number, by comparing with the results obtained in macro scale. This gives optimal factors for designing microfluidic channels for cell or particle separation, particle focusing, and so on.

**Key Words :** Particle Laden Flow, Relative velocity (상대속도), Particle migration (입자이동), Microchannel (마이크로채널)

### 1. 서 론

마이크로 유체기기로는 마이크로펌프, 마이크로밸브 그리고 최근 바이오 분야에서 주목을 받고 있는 랩칩 (lab-on-a-chip) 등이 있다. 마이크로 유체기기는 마이크로 채널을 그 통로로 하여 입자상태의 물질을 수송하게 된다. 수송입자의 크기는 작게는 분자수준의 수 옹스트롱 (Angstroms)부터, 크게는 입자 또는 세포수준인  $1 \sim 10 \mu\text{m}$  정도에 이른다. 채널내 유속은 대개 수  $\text{cm/s}$  이하에 이르며, 레이놀즈수 ( $Re$ )는 대부분  $30$  이하이다 (Stone & Kim, 2001). 유체기기의 정상적인 작동을 위해서는 입자의 정확한 거동해석이 요구되며 (Fuller et al, 2000), 이를 위하여 유체의 속도뿐만 아니라 입자의 속도를 정확히 측정하고 나아가 입자의 운동특성을 해석하는 것이 중요하다.

Segre & Silberberg (1962)는 원형관내 입자가 흐를 때 입자의 농도가 비균일하게 분포한다는 사실을 관찰하였으며, 이 후 다른 연구자들에 의해 입자는 대략  $r/R = 0.45 \sim 0.63$  에 분포한다고 밝혀졌다 (Brenner, 1966). 이러한 연구는 높은  $Re$  에서 최근

까지 연구가 진행되었다 (Matas & Jeffery, 2003). 한편, 관내유동에서 관의 내경 ( $D$ )에 비하여 입자의 크기 ( $d_p$ )가 상대적으로 크면, 입자와 유체사이에 미끄럼이 발생하며 (Goldsmith & Mason, 1966), 최근까지 이와 관련한 이론적인 연구가 수행되었다 (Joseph & Ocando, 2002). 이와 관련하여 많은 경우 이론적인 연구와, macro 영역에서 실험적인 연구가 수행되었으며, micro 영역에서는 특히 실험적 연구가 미흡한 실정이다. Uiftewaal et al (1993)은  $100 \mu\text{m}$  직사각형 채널에서 입자의 속도와 농도 분포에 관한 연구를 수행하였으며, 벽 근처에서 입자의 속도분포가 이론값과 차이를 보이는 현상을 관찰했다. 최근, 평균유속이  $25 \mu\text{m/s}$  인  $500 \mu\text{m}$ 의 직사각형 채널에서 입자와 채널의 상대적 크기비 ( $B = D/d_p$ )에 따른 입자와 유체의 상대속도에 관한 연구가 수행되었다 (Staben & Davis, 2005). 그러나  $B$  값이 달라질 때 유체와 입자의 동시측정에 의한 이들의 상대속도의 측정,  $Re$  값에 따른 입자이동 (particle migration) 및 반지름방향 농도분포 그리고 입자이동에 민감하게 영향을 미치는 인자 등에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 원형 마이크로채널에서  $B$  값의 변화에 따른 입자와 유체의 속도를 동시에 측정함으로써, 이들의 상대속도를 분석하고, 입자의 반지름방향 농도분포특성에 관하여 연구하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 형광입자와 형광현미경, Nd:YAG 레이저, cooled CCD 카메라를 이용하였다.

† 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : jyyoo@snu.ac.kr

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부

\*\* 서울대학교

## 2. 실험장치 및 방법

입자의 영상을 획득하기 위하여 inverted 타입의 형광현미경장치 (Olympus, IX50), 파장이 532 nm인 Nd:YAG 레이저 (Continuum Electro-Optics, 100) 그리고 cooled CCD (PCO, SensiCam) 카메라를 이용하였다. CCD 카메라의 가로 및 세로의 픽셀수는 1300×1024 이며, 영상은 12bit 형식으로 저장하였다. 테프론 관을 사용함으로써 입자의 영상왜곡을 최소화 하였다. 한편, 22%의 물-글리세린 용액을 사용함으로써 입자와 작동유체의 밀도를 비슷하게 조절한 후 입자가 뜨지도 가라 앉지도 않음을 확인하였다. 주사기와 관을 luer 타입 커넥터로 연결하였으며, 시린지펌프 (KD Scientific, KDS 100)의 유량을 조절하여 유동속도를 변화시켰다. 실험조건에 따라서 700~1000 장의 영상세트 (image set)를 5 Hz간격으로 획득하였다.

Table. 1 Experimental conditions

Parameters	Tube Dimensions		
	89 $\mu\text{m}$	216 $\mu\text{m}$	550 $\mu\text{m}$
Maximum velocity $U_{\text{max}}$ (mm/s)	2~150	4~190	3~500
Reynolds number $Re_{\text{tube}}$	0.06~4.6	0.35~14.5	0.75~102
Shear rate $\dot{\gamma}$ (1/s)	47~3529	37~1760	10~1820
Particle volume fraction (%)	0.1	0.1	0.1
Large particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	6	10	10
Seed particle diameter ( $\mu\text{m}$ )	1	-	-
Objective lens magnification	40×		10×
Numerical aperture	0.75		0.35
Focal depth (Mehrlart, 1999, $\mu\text{m}$ )	0.45		8.9

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 입자속도 분포

획득된 영상에서 2-D Gaussian fitting 을 이용하여 입자의 중심을 구했으며, 입자속도는 PTV 알고리즘 (Jin et al, 2004)을 이용하여 계산하였다. 유동이 축방향으로 지배적임을 고려하여, 입자의 변위가 크더라도 속도계산시 오차를 최소화 할 수 있도록 PTV 알고리즘을 수정하였다. Fig. 1 (a)는 직경이 89  $\mu\text{m}$ 인 관에 1  $\mu\text{m}$ 형광입자의 속도장을 나타내고 있다. Fig. 1(b)는 앞에서 얻어진 속도장에서 반지름방향과 축방향으로 각각 40, 60 개의 그리드를 형성하여 그리드 내의 속도값을 평균한 결과이다. Fig. 1 (b)에서 나타났듯이 벽 근처에서 속도가 거의 0 이고 중앙에서 최대치를 갖는, 전형적인 관내유동 특성을 잘 나타내고 있다. Fig. 2 는  $B = 21.6$  ( $D_t = 216 \mu\text{m}$ )일 때 10  $\mu\text{m}$ 형광입자의 속도분포를 나타내고 있다. 이는 실험조건이 본 연구와 유사하고,

PIV 알고리즘을 이용한 Koutsiaris et al (1999)의 결과와 거의 일치함을 보였다. 한편,  $D_t = 550 \mu\text{m}$ 에서도 입자는 유체의 속도와 거의 일치함을 보였다. 이상의 실험결과로부터  $B = 21.6$  보다 큰 경우 입자는 유체를 잘 따라간다고 볼 수 있다.

$B = 14.9$  ( $D_t = 89 \mu\text{m}$ )에서 입자와 유체의 상대속도를 측정하기 위하여, Table.1 같은 실험조건을 이용하였으며, 이때 작은입자 ( $d_p = 1 \mu\text{m}$ )는 유체를 잘 따른다고 가정하였다.  $B$  값이 작아지게 되면, 입자를 판독 (detection)할 시 적절한 threshold 값을 부여하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 Olsen & Adrian (2000)이 제안한 이론식을 근거로 하여, 관의 중앙단면을 기준하여  $\pm 3 \mu\text{m}$ 이내 ( $D_t$ 의 6.7%)의 입자만 판독할 수 있도록 threshold 값을 부여했다. 이 때의 threshold 값은 약 480 이며, threshold 값을 400~540 까지 변화시키면서 큰입자의 속도변화를 측정한 결과, 속도는 threshold 값에 민감하지 않음이 확인되었다.

Fig. 3 (a)는 유체의 최대유속이 2.216 mm/s 인 경우 큰입자와 유체의 상대속도를 나타낸다. 이 때 큰입자와 유체의 평균속도는 각각 1.919 와 2.00 mm/s 이며, 큰입자의 평균속도는 유체평균속도의 약 95%이다. 실제로 액체와 밀도가 같은 구형입자가 관을 통과할 때 주위 유체와 미끄럼이 발생한다. 특히 입자와 액체와의 밀도비가 1.01 인 타원형의 입자는 관중앙의 최대유체속도를 기준으로 약 5%의 미끄러짐이 발생하였다고 보고되었다 (Joseph & Ocando, 2002). Fig. 3 (b)는 유체의 최대속도가 8.725 mm/s 인 경우에 유체와 큰입자의 속도분포를 표시하였다. 이 경우 입자의 평균속도는 유체의 약 84.5%임이 확인되었으며, 일반적으로 유속이 높아지면 상대속도의 크기도 증가한다. 그러나 본 연구에서는 이와 같이 일관된 양상은 관찰되지 않았다. 한편, 마이크로채널에서 채널크기에 비해서 입자가 상대적으로 클 경우 입자와 유체의 평균속도가 다르다는 연구가 최근 보고되었다 (Staben & Davis, 2005). 그러나 이들 상대속도를 정밀하게 측정하기 위해서는 공초점현미경과 같은 우수한 계측장비가 요구될 것으로 사료된다.

### 3.2 입자농도 분포

입자의 농도분포를 알아보기 위하여 Table.1 에 표시한 바와 같이 실험조건을 이용하였다. 이 때  $B$  값의 크기는 각각 14.9, 21.6, 55 이며,  $Re$  와  $\dot{\gamma}$  를 변화시키면서 관찰하였다. Fig.4 는  $D_t = 89 \mu\text{m}$ 이고  $Re = 0.07$  와 2.32 인 경우 농도분포를 나타낸다.  $Re$  가 0.07 인 경우, 입자는 중앙부근을 중심으로 거

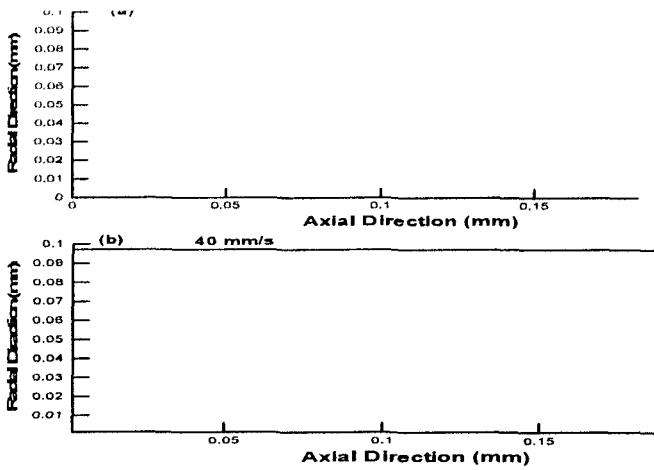


Fig. 1 PTV results for 1- $\mu\text{m}$  seed particles in  $D_1 = 89 \mu\text{m}$ :  
(a) raw vector, (b) averaged vector

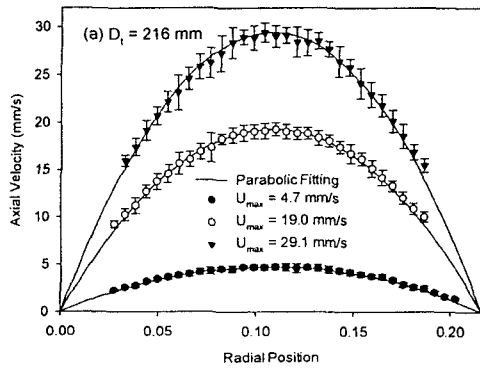


Fig. 2 Velocity profiles of 10- $\mu\text{m}$  particles at  $B = 21.6$

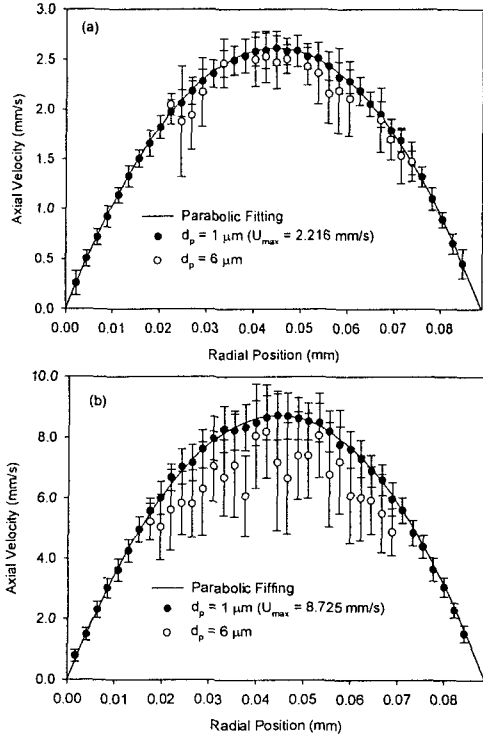


Fig. 3 Relative velocity profiles at  $B = 14.9$ :  
(a)  $U_{\text{max}} = 2.216 \text{ mm/s}$ , (b)  $U_{\text{max}} = 8.725 \text{ mm/s}$

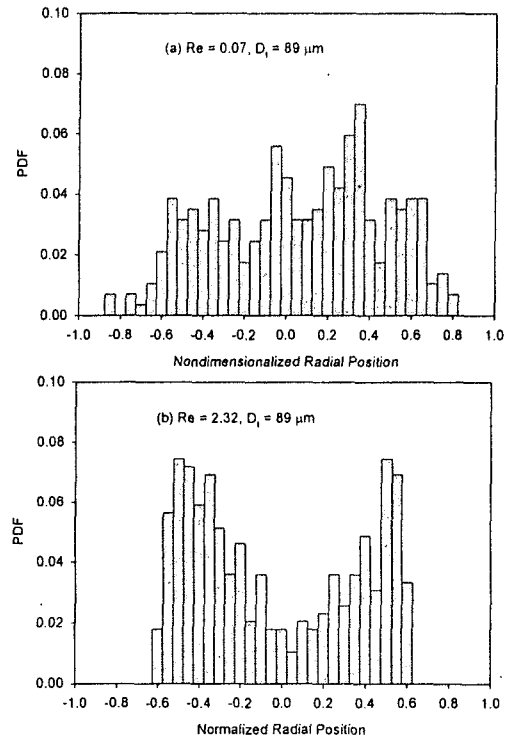


Fig. 4 Concentration distribution of 6- $\mu\text{m}$  particles at  
 $B = 14.9$

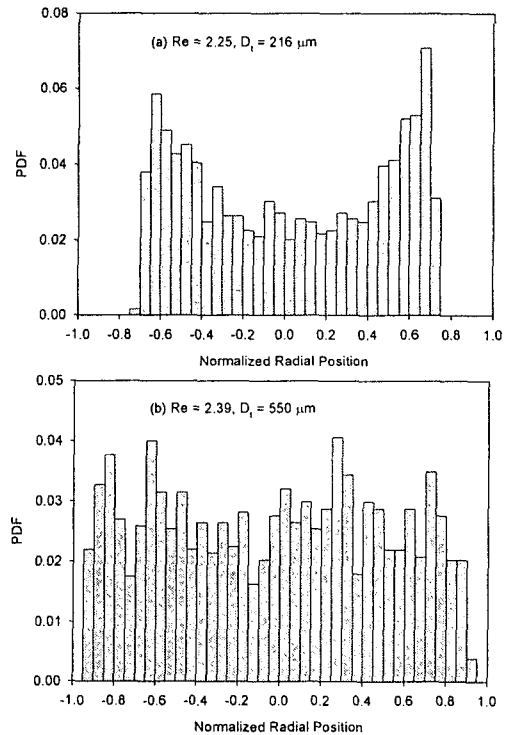


Fig. 5 Concentration distribution of 10- $\mu\text{m}$  particles:  
(a)  $B = 21.6$ , (b)  $B = 55$

의 일정하게 분포됨을 알 수 있으며, 반면  $Re$  가 2.32 인 경우는 평형위치 (equilibrium position,  $r/R$ ) 는 0.5 근처에서 입자가 집중하는 것을 볼 수 있으며, 이와 같이 평형위치가 존재하는 현상은 다른

연구자의 결과 (Matas & Jeffery, 2004)에서도 관찰되었다. 입자이동 (radial migration) 현상은 관의 벽에서 작용하는 양력 (lift force), 전단구배 (shear gradient) 등에 의해서 발생하며,  $d_p$ ,  $D_t$ ,  $B$  그리고  $Re$  등에 의해서 지배적인 영향을 받는다.

Fig. 5 (a)와 (b)는  $D_t = 216, 550 \mu\text{m}$ 이고,  $Re$  는 각각 2.25, 2.39 일 때의 입자분포 결과를 나타낸다. 입자의 농도분포가  $Re$  에 어떻게 영향을 받는가를 알아보기 위하여 Fig. 4 (b), Fig. 5의 (a)와 (b)의 결과를 비교해보았다.  $D_t = 550 \mu\text{m}$ 의 경우인 Fig. 5(b)을 보면 농도분포가 거의 균일함을 알 수 있다. 따라서  $Re$  값이 같더라도  $B$  값에 따라서 입자분포의 형태가 달라짐을 알 수 있다. 한편, 입자분포에 대한 전단값 ( $\dot{\gamma} = U_{\text{max}}/R$ )의 효과를 알아보기 위해서  $D_t$ 가  $89 \mu\text{m}$  ( $\dot{\gamma} = 1619/\text{s}^{-1}$ ,  $B = 14.9$ ),  $216 \mu\text{m}$  ( $\dot{\gamma} = 1714/\text{s}^{-1}$ ,  $B = 21.6$ ) 그리고  $550 \mu\text{m}$  ( $\dot{\gamma} = 1854/\text{s}^{-1}$ ,  $B = 55$ )인 경우 즉, 비슷한 전단값의 조건에서 입자분포를 관찰했다. 입자의 평행위치는 각각 5, 6.5 그리고 8.2 임을 관찰하였다. 그러나  $D_t$ 가  $216 \mu\text{m}$ 에서 입자분포는 중앙은 물론 벽근처에서 입자의 공핍영역이 관찰되는 반면,  $D_t$ 가  $89$  그리고  $550 \mu\text{m}$ 에서는 벽 근처에서만 입자공핍영역 (particle free layer)이 관찰되었다. 즉, 전단값이 비슷하더라도  $B$  값에 따라서 입자공핍영역의 특성이 달라짐을 알 수 있다. 한편, micro 영역에서 입자평행위치는 macro 영역과 비교해 볼 때, 낮은  $Re$  값에서 존재하는 것을 관찰하였다.

입자이동과 관련한 대부분의 실험연구는 macro 영역에서 입자의 평행위치가  $Re$  값에 따라서 어떻게 이동하는지에 대해서 집중되었다. 최근 마이크로 영역에서 반지름 방향의 입자 이동을 이용한 입자 분리기술, 급격한 유로에서의 세포분리 기술, 입자 포커싱 (radial focusing) 등에 관한 연구가 진행되고 있는 것을 고려하면, 실제 마이크로 영역에서는 입자평행위치는 물론, 벽으로부터 입자공핍영역의 두께, 관중앙에서 입자공핍영역의 정도 등에 관한 연구가 중요한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

원형관내 입자의 속도분포 및 농도분포를 조사하기 위하여 형광현미경 장치를 이용하였다. 관크기에 비하여 입자의 크기가 상대적으로 커지게 되면 입자와 유체간에 상대속도가 발생하는 것이 관찰되었다. 한편, 입자가 반지름방향으로 이동하는 현상이 관찰되었으며, 이는 macro 영역에서의 결과와 비교하면, 낮은  $Re$  에서 발생하였다. 한편

입자분포의 특징은  $B$  값에 의해 지배적 영향을 받으며, 이러한 연구는 마이크로채널에서 입자분리, 포커싱 등에 응용 가능하리라 사료된다.

#### 후 기

이 연구는 마이크로열시스템연구센터의 지원으로 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Brenner, H., 1966, "Hydrodynamic Resistance of Particles at Small Reynolds Numbers," *Adv. Chem. Engng. Vol.6*, pp. 287-438.
- 2) Fuller, C. K. et al, 2000, "Microfabricated Multi-frequency Particle Impedance Characterization System,"  $\mu$ -TAS '00, 265-268.
- 3) Jin, S., Huang, P., Park, J., Yoo, J.Y. and Breuer, K.S., 2004, "Near-Surface Velocimetry Using Evanescent Wave Illumination," *Exp. Fluids*, Vol. 37, pp. 825-837.
- 4) Josheph, D. D. and Ocando, D., 2002, "Slip Velocity and Lift," *J. Fluid Mech.*, Vol. 454, pp. 263-286.
- 5) Koutsiaris, A. G., Mathioulakis, D. S. and Tsangaris, S., 1999, "Microscope PIV for Velocity-field Measurement of Particle Suspensions flowing inside Glass Capillaries," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 10, pp. 1037-1046.
- 6) Matas, J. P. and Jeffery, F. M., 2004, "Inertial migration of rigid spherical particles in Poiseuille flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 515, pp. 171-195.
- 7) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, "PIV Measurements of a Microchannel Flow," *Exp. Fluids*, Vol. 27, pp. 414-419.
- 8) Olsen, M. G. and Adrian, R. J., 2000, "Out-of-focus Effects on Particle Image Visibility and Correlation in Microscopic Particle Image Velocimetry," *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. S166-S174.
- 9) Segre, G. and Silberberg, A., 1962, "Behavior of macroscopic rigid sphere in Poiseuille flow. Part 2. Experimental results and interpretation," *J. Fluid Mech.*, vol. 14, pp. 136-157.
- 10) Staben, M. E. and Davis, R. H., 2005, "Particle Transport in Poiseuille Flow in Narrow Channels," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 31, pp. 529-547.
- 11) Stone, H. A. and Kim, S., 2001, "Microfluidics: Basic Issues, Applications, and Challenges," *AIChE Journal*, Vol. 47, pp. 1250-1254.
- 12) Uijttewaal, W. S. J., Nijhof, E. J. and Heethaar, R. M., 1994, "Lateral Migration of Blood Cells and Microspheres in Two-Dimensional Poiseuille Flow: A Laser-Poppler Study," *J. Biomech.*, vol. 27, pp. 35-42.