〈학술논문〉 DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.4.297

비등간격 전극열에서의 입자 통과시간을 이용한 전기적 입자속도분포 검출기

김태윤* · 이동우* · 조영호†

(2007년 3월 16일 접수, 2008년 2월 20일 심사완료)

An Electrical Particle Velocity Profiler Using Particle Transit Time Across Uneven Inter-Gap Electrodes

Taeyoon Kim, Dong Woo Lee and Young-Ho Cho

Key Words : Particle Velocity Profiler(입자속도분포 검출기), Particle Transit Time(입자 통과시간), Particle Image Velocimetry(입자영상 유속계), In-Channel Clogging Detection(유로 내 막힘 감지)

Abstract

We present an electrical particle velocity profiler using particle transit time across uneven inter-gap electrodes. We measure both the particle position and velocity from the voltage signals generated by the particles passing across sensing electrodes, thus obtaining the velocity profile of the particles in a microfluidic channel. In the experimental study, we use polystyrene microparticles to characterize the performance of the electrical particle velocity profiler. The particle velocity profile is measured with the uncertainty of 5.44%, which is equivalent to the uncertainty of 5% in the previous optical method. We also experimentally demonstrate the capability of the present method for in-channel clogging detection. Compared to the previous optical methods, the present electrical particle velocity profiler offers the simpler structure, the cheaper cost, and the higher integrability to micro-biofluidic systems.

기호설명

y: : 감지구역을 통과하는 입자의 위치
v: : 감지구역을 통과하는 입자의 속도
R_w: : 신호 폭의 비율
T_w: : 신호 폭의 합
T_1: : 제 1 감지구역에서 발생된 신호의 폭
T_2: : 제 2 감지구역에서 발생된 신호의 폭

† 책임저자, 회원, KAIST 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-8691 FAX : (042)869-8690
* KAIST 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

1. 서 론

최근 미세유동 소자 내에서 입자의 유동을 관찰함으로써 미세유동을 가시화하거나,[1~3] 바이오 입자의 물성을 분석하는 연구[4,5]가 활발히 진행되고 있다. 또한 미세유동 소자에서 흔히 발생하는 유로 내 막힘[6]을 사전에 감지하기 위해, 유로 내에서 입자의 속도분포를 분석할 수 있는 방안이 요구되고 있다. 특히 휴대용 미세유동 소자(portable microfluidic chip)의 경우, 간단한 방법을 이용하여 단일소자 위에 (on-chip) 집적될 수 있는 입자속도분포 검출기가 요구되고 있다.

이에 입자영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV)[1~3]와 같이 광학적으로 입자의 속도분포를 가시화할 수 있는 방법이 제안되었다. 그러나 이러한 광학적 입자속도분포 검출기는 복잡한 광학장비로 인해 소형화가 어렵고, 투명한 유로를 사용해야 하는 한계가 있다. 특히 유로 소재의 제한을 해결하기 위해 엑스레이[2] 혹은 적외선[3]을 이용한 입자영상 유속계가 연구되었으나, 이 방법들 역시 특수한 광원을 필요로 하여 시스템이 값비싸고 부피가 큰 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 미소유로 내에 유체의 흐름 방향을 따라 전극열을 비등간격으로 배열하고 유체 내의 입자가 전극열을 통과하는 시간을 측정하여 입자의 속도분포를 검출하는 방법을 제안하였다. 제안된 입자속도분포 검출기는 전기적 원리를 이용하여 미소유로 내의 입자속도분포를 검출하기 때문에 구조가 간단하고 집적화가 용이하며 유로 재료의 선택에 있어 제한을 받지 않는 장점을 가지고 있다. 또한 제안된 검출기를 이용하여 미소유로 내의 입자속도분포를 측정함으로써 입자에 의한 유로 내 막힘을 사전에 감지할 수도 있다.

2. 이론 및 설계

2.1 동작원리

제안된 입자속도분포 검출기는 미소유로 내에 세 개의 감지전극을 Fig. 1 과 같이 비등간격으로 설치하여 두 개의 연속적인 감지구역을 형성한다. Figure 2 는 유체 내의 입자가 두 감지구역을 차례로 통과하면서 발생되는 신호를 나타낸다. 두 감지구역의 길이는 Fig. 1 과 같이 입자의 통과위치에 따라 상보적으로 변화하면서 그 총합은 일정하므로 Fig. 2 의 두 신호 폭의 비율, $R_w=T_2/(T_1+T_2)$로부터 입자의 위치, y를, 두 신호 폭의 합, $T_w=T_1+T_2$으로부터 입자의 속도, v를 측정할 수 있다. 신호 폭의 비율, R_w 및 신호 폭의 합, T_w으로부터 입자 위치 및 속도를 산출하는 식은 각각 다음과 같다.

$$R_w = \left\{\frac{L_{2\max}-L_{2\min}}{wL}\right\} y + \left\{\frac{L_{2\max}+L_{2\min}}{2L}\right\} \quad (1)$$

$$T_w = \frac{L}{v} \quad (2)$$

여기서 L_{2max}, L_{2min}, w, L은 각각 제 2 감지구역의 최대, 최소길이, 유로의 폭, 두 감지구역의 총 길이를 의미한다. 따라서 제안된 방법은 식 (1)과 (2)를 근거로 한 출력신호의 간단한 분석을 통해 입자의 위치와 속도를 측정하고 이를 이용하여 입자의 속도분포를 검출할 수 있다.

2.2 소자설계

Figure 4 는 본 입자속도분포 검출기의 성능시험을 위해 설계된 두 종류의 소자를 나타내고 있다. 소자 A는 두 개의 완충유로를 설치하여 입자 시료유량, Q_P을 일정하게 두고 두 완충용액의 유량, Q_{S1}과 Q_{S2}을 변화시킴으로써 감지구역을 통과하는 입자위치를 조절, 제안된 방법의 입자위치 측정성능을 검증하기 위한 것이다. 한편 소자 B는 단일유로 내의 시료유량, Q_P을 변화시킴으로써 감지구역을 통과하는 입자속도를 조절, 제안된 방법의 입자속도 및 입자속도분포 측정성능을 평가하도록 설계되었다. 제안된 소자에서 미소유로의 폭과 높이는 입자의 지름 6 μm을 고려하여 Fig.1 과 같이 각각 50 μm와 10 μm로 설계되었다. 두 감지구역의 최소길이, L_{1min}과 L_{2min}는 입자 지름보다 네 배 큰 25 μm로 설계하여, 입자의 감지구역 통과 시 발생하는 전기신호의 폭으로부터 뚜렷한 입자 통과시간을 얻을 수 있도록 하였다. 한편 두 감지구역의 최대길이, L_{1max}과 L_{2max}는 95 μm로 설계하여, 입자 위치 측정의 감도가 식 (1)에 의해 1.161%/μm의 높은 값을 갖도록 하였다.

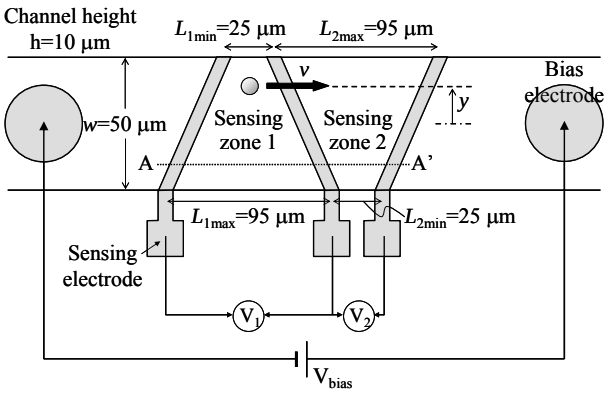

Fig. 1 An electrical particle velocity profiler

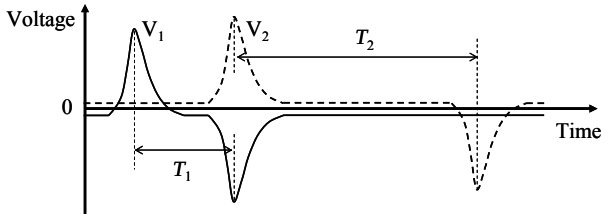

Fig. 2 Electrical signals generated by the particle passing through the sensing zones in Fig.1

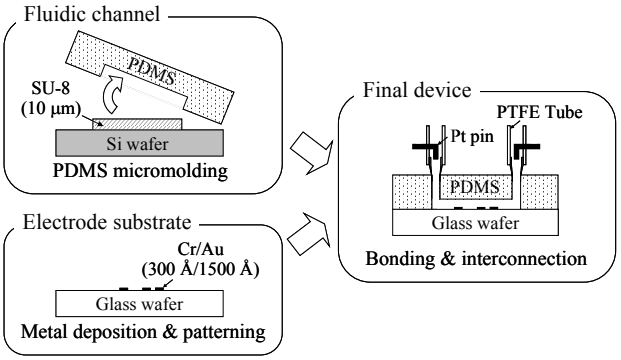

Fig. 3 Fabrication process of the electrical particle velocity profiler, showing the cross section along A-A' in Fig. 1

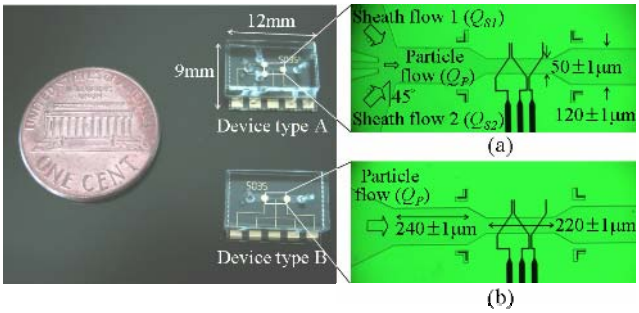

Fig. 4 Fabricated devices: (a) detection region of the device A; (b) detection region of the device B

3. 제작 공정

제안된 전기적 입자속도분포 검출기의 제작공정은 Fig. 3 과 같이 PDMS (Polydimethylsiloxane) 미소유로의 제작, 전극이 형성된 유리기판의 제작 및 제작된 미소유로와 유리기판의 접합의 세 단계로 이루어진다.

먼저 실리콘 웨이퍼 위에 10 μm 두께의 SU-8 2010 photoresist (MicroChem, Newton, MA) 패턴을 형성하여 몰드를 제작하였다. 그 후 PDMS 프리폴리머 혼합물 (curing agent: PDMS = 1: 10, Slygard® 184, Dow Corning, Midland, MI)을 몰드에 붓고 85 ˚C에서 두 시간 동안 경화시켜 미소유로를 제작하였다. 한편 전극이 형성된 유리기판의 제작을 위하여, Pyrex® 웨이퍼 위에 크롬과 금 박막을 각각 300 Å과 1500 Å의 두께로 증착한 후 습식 식각하여 전극을 형성하였다. 그 후, 미소유로의 표면을 고주파 발생기 (BD-10AS, Electro-Technic Products, Ravenswood, IL)를 이용하여 약 10 초간 플라즈마 처리한 후 전극이 형성된 유리기판과 접합하였다. 마지막으로 Teflon® 튜브 (Omnifit, UK)와 백금 전극을 PDMS 유로에 연결시킴으로써 Fig. 4 와 같은 소자를 제작하였다.

Table 1 Flow rate conditions for the particle position measurement using the device A*

Condition ID	Q_P [μl/min]	Q_{S1} [μl/min]	Q_{S2} [μl/min]
Q_{A1}	0.46	3.45	0.69
Q_{A2}	0.46	2.07	2.07
Q_{A3}	0.46	0.69	3.45

* Q_P, Q_{S1}, and Q_{S2} denote the flow rates in Fig.4a.

Table 2 Flow rate conditions for the particle velocity and velocity profile measurement using the device B*

Condition ID	Q_P [μl/min]
Q_{B1}	1.85
Q_{B2}	2.68
Q_{B3}	3.60

* Q_P denotes the flow rate in Fig.4b.

4. 성능 시험

제작된 소자의 성능시험을 위해 전기 전도도가 1.1 S/m인 PBS (Phosphate buffered saline) 용액에 1.2×10^4 /ml의 농도로 희석된 형광 폴리스티렌 입자 (지름=6.59±0.60 μm, PolySciences, Warrington, PA)를 사용하였다. Table 1 은 소자 A로부터 입자위치 측정성능을 평가하기 위한 유량조건을, Table 2 는 소자 B로부터 입자속도 및 입자속도분포 측정성능을 검증하기 위한 유량조건을 각각 정리한 것이다. 이러한 입자위치/속도/속도분포 측정 시, 폴리스티렌 입자와 PDMS 유로의 흡착을 방지하기 위해 입자의 표면을 0.5wt%의 BSA (Bovine serum albumin, Sigma Chemical, St. Louis, MO)로 처리하였다. 끝으로, 제안된 방법의 유로 내 막힘 감지성능을 확인하기 위해 소자 B 에 1.7 μl/min의 유량으로 입자를 주입하여 유로의 막힘에 의한 속도분포 변화를 관찰하였다. 이러한 유로 내 막힘 감지 실험 시, 표면 처리하지 않은 폴리스티렌 입자를 이용함으로써 입자가 유로에 부착되도록 유도하였다.

4.1 입자위치 및 속도 검출

소자 A 에서 Table 1 과 같이 감지구역을 통과하는 입자위치를 조절한 결과, Fig. 5 의 출력신호를 얻었다. Figure 7 은 형광입자의 영상분석을 통해 측정된 입자위치와 Fig. 5 의 신호의 폭 비율 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 80 여 개의 입자에 의한 데이터를 분석한 결과 (Table 3), 제안된 방법이 3.34%의 불확실도 내에서 입자의 위치를 검출할 수 있음을 확인하였다.

Figure 6 은 소자 B에서 Table 2 와 같이 감지구역을 통과하는 입자속도를 변화시킴에 따라 발생된 출력신호이며, Fig. 8 은 Fluent® 6.2.16 (Fluent Inc., Lebano, NH)을 이용한 수치해석에 의해 예측된 입자속도와 출력신호 (Fig. 6)의 폭의 합 사이의 관계를 나타낸 그래프이다. 300 여 개의 입자에 의한 데이터를 분석한 결과 (Table 4), 제안된 검출기에 의한 입자속도 측정의 불확실도는 2.21%로 평가되었다.

4.2 입자속도분포 검출

Figure 9 는 소자 B에서 Table 2 의 실험조건으로 측정한 입자의 속도분포와, 수치해석에 의해 예측된 입자속도분포를 비교한 것이다. 300 여 개의 입자에 의한 데이터를 분석한 결과, 제안된 방법이 5.44%의 불확실도 내에서 입자속도분포를 검출할 수 있음을 확인하였다. 이는 기존의 광학적 방법인 적외선 입자영상 유속계에서의 불확실도인 5%[3]와 비슷한 값으로서, 제안된 방법이 간단한 구조를 이용하면서도 기존의 광학적 방법과 대등한 입자속도분포 검출성능을 가짐을 입증하는 것이다.

Table 3 Measured data from the device A and the particle position uncertainty*

Condition	T_1 [msec]	T_2 [msec]	$R_w=T_2/(T_1+T_2)$ [%]	$y^{1)}$ [μm]	$Y^{2)}$ [μm]	Uncertainty 3) [%]
Q_{A1}	0.380 ±0.0284	0.209 ±0.0152	35.552 ±2.157	-14.748 ±1.874	-16.420 ±1.604	3.34
Q_{A2}	0.270 ±0.0195	0.295 ±0.0188	52.216 ±2.461	-0.283 ±2.138	-1.923 ±1.679	3.28
Q_{A3}	0.194 ±0.0184	0.384 ±0.0297	66.397 ±2.374	12.027 ±2.062	12.821 ±1.371	1.59

1) Particle position measured by the present method
2) Particle position measured by optical image analysis
3) |Average of y – average of Y|/(channel width=50 μm)×100 [%]
* The data (mean±standard dev.) are measured from ~80 particles.

Table 4 Measured data from the device B and the particle velocity uncertainty*

Condition	T_1 [msec]	T_2 [msec]	$T_w=T_1+T_2$ [msec]	$v^{1)}$ [m/sec]	$V^{2)}$ [m/sec]	Uncertainty 3) [%]
Q_{B1}	0.654 ±0.135	0.601 ±0.134	1.255 ±0.0745	0.0956 ±0.00575	0.0937	2.03
Q_{B2}	0.511 ±0.088	0.394 ±0.085	0.905 ±0.058	0.133 ±0.00865	0.136	2.21
Q_{B3}	0.376 ±0.063	0.284 ±0.0565	0.660 ±0.046	0.182 ±0.0129	0.182	0

1) Particle velocity measured by the present method
2) Particle velocity estimated by numerical simulation
3) |Average of v – V|/V×100 [%]
* The data (mean±standard dev.) are measured from ~300 particles.

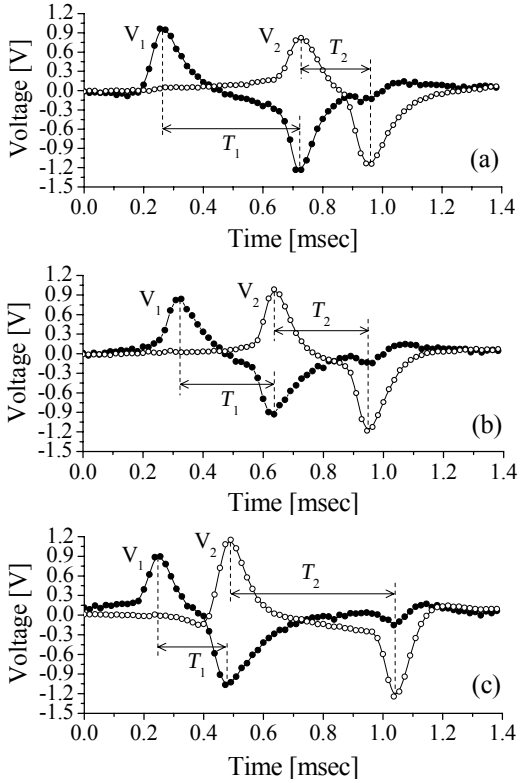

Fig. 5 Electrical signals for the particles passing through the sensing zones 1 and 2 in the device A: (a), (b), and (c) at the conditions of Q_{A1}, Q_{A2}, and Q_{A3} in Table 1, respectively

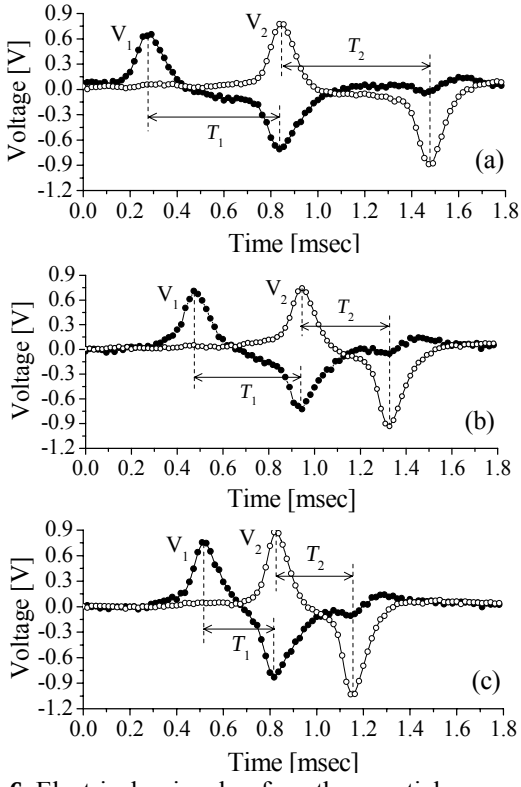

Fig. 6 Electrical signals for the particles passing through the sensing zones 1 and 2 in the device B: (a), (b), and (c) at the conditions of Q_{B1}, Q_{B2}, and Q_{B3} in Table 2, respectively

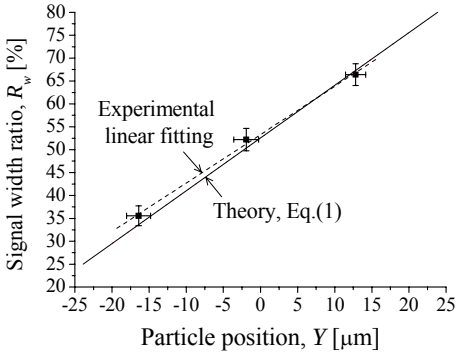

Fig. 7 Signal width ratio measured by the device A vs. particle position measured by the optical analysis

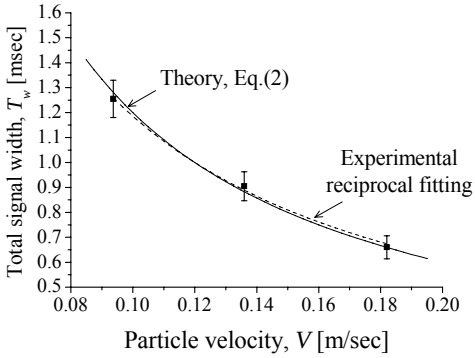

Fig. 8 Total signal width measured by the device B vs. particle velocity estimated by Fluent® simulation

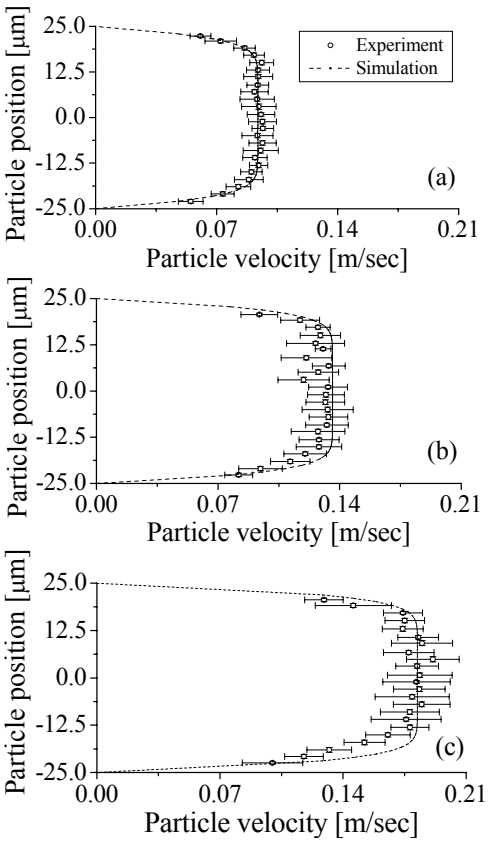

Fig. 9 Particle velocity profiles measured by the device B: (a), (b), and (c) at the conditions of Q_{B1}, Q_{B2}, and Q_{B3} in Table 2, respectively

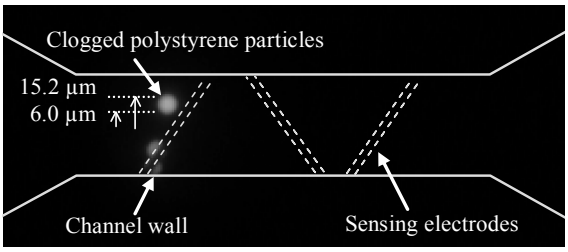

Fig. 10 Fluorescence image of the fluidic channel clogged by bare polystyrene particles

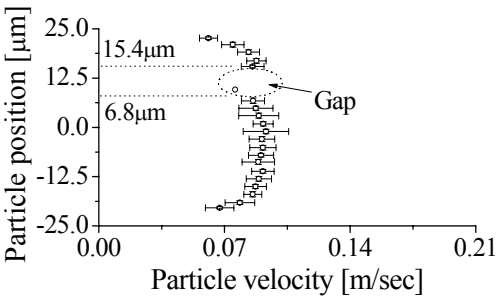

Fig. 11 Particle velocity profile obtained from the device B for the fluidic channel clogged as shown in Fig.10 at the particle flow rate of 1.7 μl/min

4.3 유로 내 막힘 감지

Figure 11 은 폴리스티렌 입자가 Fig. 10 과 같이 유로에 흡착되었을 때 측정된 입자속도분포를 나타낸 것이다. 그 결과, 6.8 μm ~ 15.4 μm 의 유로 위치에서 입자속도분포의 공백을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 10 과 같이 입자로 인해 유로가 막힌 부분의 위치인 6 μm ~ 15.2 μm 에서 입자속도분포의 특이점이 관찰된 것이다. 따라서 제안된 입자속도분포 검출기에 의해 유로 내 막힘을 효과적으로 감지할 수 있음을 증명하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 비등간격 전극열에서의 입자 통과시간을 이용한 전기적 입자속도분포 검출기를 제안하고 설계하였으며 그 성능을 실험적으로 분석하였다. 그 결과, 제안된 검출기는 5.44%의 불확실도 내에서 입자의 속도분포를 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한 제안된 검출기에 의해 측정된 입자속도분포를 바탕으로 유로 내 막힘을 효과적으로 감지할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 따라서 본 입자속도분포 검출기는 기존의 광학적 방법에 비해 구조가 간단하고 유로 재료 선택이 용이한 장점을 가지면서도 대등한 불확실도로 입자속도분포를 검출할 수 있어, 집적화된 시스템에 용이하게 적용될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 "생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Meinhart, C. D., Wereley, S. T. and Santiago, J. G., 1999, “PIV Measurements of a Microchannel Flow,” *Exp. Fluids.*, Vol. 27, pp. 414~419.

(2) Lanzillotto, A. M., Leu, T. S., Amabile, M., Wildes, R. and Dunsmuit, J., 1996, “An Investigation of Microstructure and Microdynamics of Fluid Flow in MEMS,” *in Proceedings of the ASME aerospace division AD-52*, pp. 789~795.

(3) Liu, D., Garimella, S. V. and Wereley, S. T., 2005, “Infrared Micro-particle Image Velocimetry in Silicon-based Microdevices,” *Exp. Fluids.*, Vol. 38, pp. 385~392.

(4) Zborowski, M., Ostera, G. R., Moore, L. R., Milliron, S., Chalmers, J. J. and Schechter, A. N., 2003, “Red Blood Cell Magnetophoresis,” *Biophys. J.*, Vol. 84, pp. 2638~2645.

(5) Walker, G. M., Sai, J., Richmond, A., Stremler, M., Chung, C. Y. and Wikswo, J. P., 2005, “Effects of Flow and Diffusion on Chemotaxis Studies in a Microfabricated Gradient Generator,” *Lab. Chip.*, Vol. 5, pp. 611~618.

(6) Mukhopadhay, R., 2005, “When Microfluidic Devices Go Bad,” *Anal. Chem.*, Vol. 1, pp. 429A~432A.