

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.3.261

# 두 평면 전극 사이의 절연체 구조물에 의해 유도되는 양의 유전영동을 이용한 삼차원 입자 정렬기

추현정\* · 도 일\*\* · 조영호†

(2008년 7월 18일 접수, 2008년 12월 9일 수정, 2009년 2월 12일 심사완료)

## A Three-Dimensional Particle Focusing Channel Using the Positive Dielectrophoresis (pDEP) Guided by a Dielectric Structure Between Two Planar Electrodes

Hyunjung Chu, Il Doh and Young-Ho Cho

**Key Words :** Three-Dimensional Particle Focusing(삼차원 입자 정렬), Positive Dielectrophoresis(양의 유전영동), Dielectric Structure(절연체 구조물)

### Abstract

We present a three-dimensional (3D) particle focusing channel using the positive dielectrophoresis (pDEP) guided by a dielectric structure between two planar electrodes. The dielectric structure between two planar electrodes induces the maximum electric field at the center of the microchannel, and particles are focused to the center of the microchannel by pDEP as they flow from the single sample injection port. Compared to the previous 3D particle focusing methods, the present device achieves the simple and effective particle focusing function without any additional fluidic ports and top electrodes. In the experimental study, approximately 90 % focusing efficiency were achieved within the focusing length of 2mm, on both x-z plane (top-view) and y-z plane (side-view) for 2 $\mu$ m-diameter polystyrene (PS) bead at the applied voltage over 15 Vp-p (square wave) and at the flow rate below 0.01  $\mu$ l/min. The present 3D particle focusing channel results in a simple particle focusing method suitable for use in integrated microbiochemical analysis system.

### 기호설명

$D$  : 입자의 지름  
 $\omega$  : 인가전기장의 각진동수  
 $\epsilon_m$  : 용액의 유전율

$\epsilon_m^*$  : 용액의 복소유전율  
 $\epsilon_p^*$  : 입자의 복소유전율  
 $K(\omega)$  : Clausius-Mosotti factor  
 $E$  : 전기장 크기

### 1. 서론

마이크로 생화학 분석 시스템에서는 간단하고 효과적인 입자, 세포, 혹은 단백질 등의 정렬이 요구 된다. 특히, 이차원 입자 정렬과는 달리 삼차원 입자 정렬은 모든 입자들이 작은 측정 영역(일반적인 계수기의 측정 영역: 5~10  $\mu$ m<sup>(1,2)</sup>)을 지나가도록 함으로써 고정밀 입자 측정을 가능케 한다.<sup>(3~5)</sup>

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 바이오및뇌공학과 및 기계공학과, 디지털나노구동연구단  
E-mail : nanosys@kaist.ac.kr  
TEL : (042)350-8691 FAX : (042)350-8690

\* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

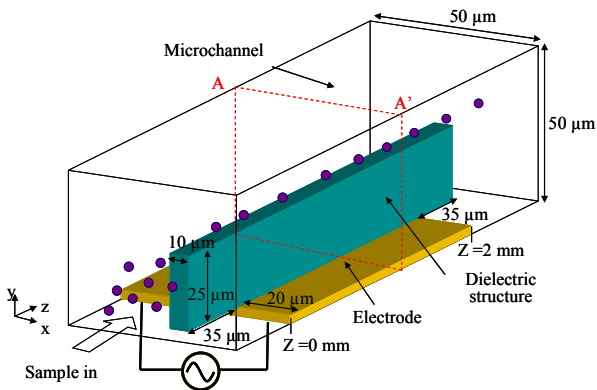
\*\* 한국과학기술원 바이오및뇌공학과, 디지털나노구동연구단

종래의 삼차원 입자 정렬기는 유체역학적 (Hydrodynamic) 입자 정렬기<sup>(2,6)</sup>나 음의 유전 영동을 이용한 입자 정렬기<sup>(3,7)</sup> 혹은 앞선 두 가지 방법을 모두 이용한 입자 정렬기<sup>(8)</sup>가 있었다. 유체역학적인 입자 정렬<sup>(2,6)</sup>은 시료 유입부를 제외한 4개의 추가적인 유체 유입부를 두고 각 유체유입부의 정확한 유량 조절에 의해 입자를 정렬하는 방법이다. 음의 유전영동을 이용한 입자 정렬은<sup>(3,7)</sup> 유로의 상/하단에 전극을 두어 음의 유전 영동에 의해 입자를 유로 중앙으로 밀어내는 방법이다. 유체역학과 음의 유전 영동을 모두 사용한 입자 정렬은 측면의 두 개의 유체 유입부로 폭 방향으로 입자를 정렬하고 유로 상/하단의 전극에 따른 음의 유전 영동에 의해 유로의 높이 방향으로 입자를 정렬하는 방법이다. 이에 본 논문에서는 추가적인 유체 유입부나 상/하단의 전극 공정이 필요하지 않은 간단하고 효과적인 정렬기를 제안하였다.

## 2. 동작 원리

본 논문에서 제안하는 삼차원 입자 정렬기는 두 평면 전극 사이에 절연체 구조물이 위치함으로써 양의 유전 영동에 의해 입자들이 채널 중앙에 정렬되도록 하였다(Fig. 1). 두 평면 전극 사이에 교류 전압을 인가하였을 때, 전기장의 최고치는 채널의 중앙인 절연체 구조물 상단에 형성하게 된다(Fig. 2). 이 때, 입자는 양의 유전 영동 Eq. 1<sup>(9)</sup>에 의해 전기장이 증가하는 방향으로 이동하여 절연체 구조물 상단에 집중된다.

$$\mathbf{F}_{\text{DEP}} = \frac{\pi D^3 \epsilon_m \text{Re}[K(\omega)] |\nabla |\mathbf{E}|^2}{4} \quad (1)$$

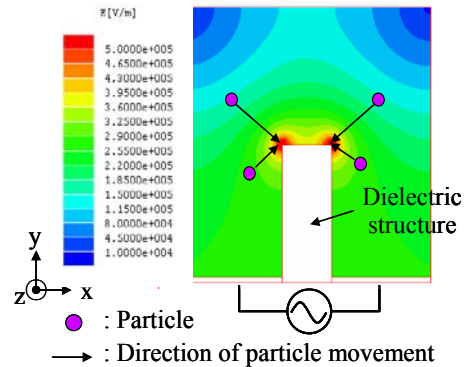


**Fig. 1** Schematic view of the present three-dimensional (3D) particle focusing channel using positive dielectrophoresis (pDEP) guided by a dielectric structure between two planar electrodes

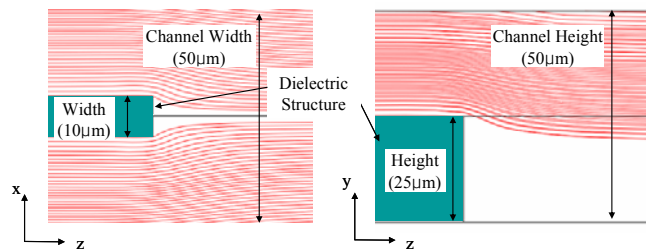
$$K(\omega) = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad (2)$$

$D$ ,  $\omega$ ,  $\epsilon_m$ ,  $\epsilon_m^*$ ,  $\epsilon_p^*$ ,  $K(\omega)$ ,  $\mathbf{E}$ 는 각각 입자의 지름, 각 진동수, 용액의 유전율, 용액의 복소유전율, 입자의 복소유전율, Clausius-Mosotti factor, 전기장 벡터의 RMS(Root Mean Square)값을 나타낸다. Clausius-Mosotti factor의 실수부가 양수일 때 양의 유전영동에 의해 입자들은 전기장이 증가하는 방향으로 이동하게 되며, 음수일 때에는 반대로 전기장이 감소하는 방향으로 이동한다.

양의 유전 영동에 절연체 구조물 상단으로 집중된 입자들은 유체의 흐름에 따라 절연체 구조물 상단을 따라 계속하여 흐르게 된다. 절연체 구조물을 다 통과한 후, 유선(streamline)은 Fig. 3과 같이 유로 중앙으로 모여지고, 절연체 구조물을 따라 흐르던 입자들 역시 유선을 따라 유로 중앙으로 정렬되게 된다.



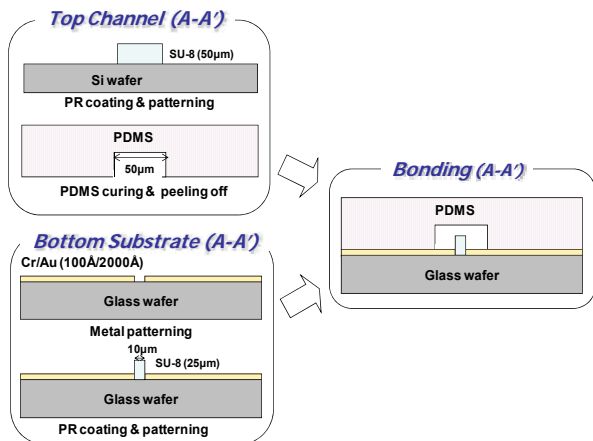
**Fig. 2** Numerical simulation of the electric field at the channel cross section (A-A' of Fig. 1) filled with buffer solution (conductivity of 0.2 mS/m), illustrating the directions of particle movement by pDEP force when 15 kHz, 15 Vp-p square wave signal are applied to the two planar electrodes



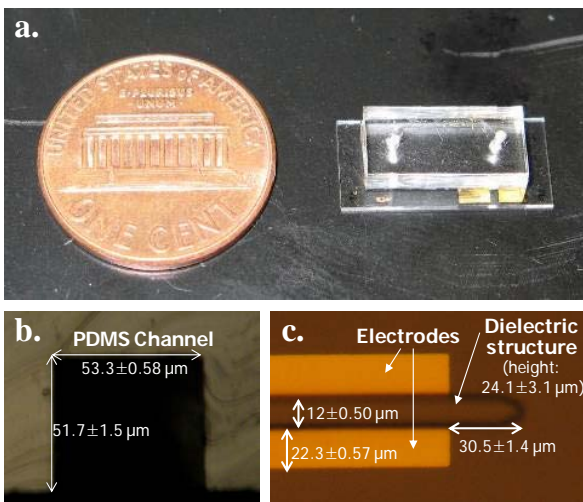
**Fig. 3** Numerical simulation of the fluid streamline near the end of the dielectric structure with the flow rate of 0.01  $\mu\text{l}/\text{min}$  and the dynamic viscosity of  $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ : (a) x-z plane (top-view); (b) y-z plane (side-view)

### 3. 설계 및 제작

본 입자 정렬기에서는 입자들이 채널 중앙으로 정렬되도록 설계하였다. 유로의 폭과 높이는 각각  $50\ \mu\text{m}$  로 설계하였고, 절연체 구조물의 높이는 채널 높이의 반인  $25\ \mu\text{m}$ , 폭은 공정 조건을 고려하여  $10\ \mu\text{m}$  로 설계하였다. 본 입자 정렬기의 정렬 성능은 정렬효율(focusing efficiency)을 통해 평가하였다. 입자 정렬효율은 전체 입자 수에 대한  $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$  의 정렬 지역(focusing region)에 정렬되는 입자의 수로 정의된다. 이때 입자의 정렬 지역은, 측정된 평균입자의 위치를 정렬지역의 중앙이 되도록 정의된다. 입자 정렬 효율은 양의 유전 영동에 의한 x-y 평면에서의 입자 움직임(Fig. 2)과 유



**Fig. 4** Fabrication process for the 2D particle focusing channel, illustrating the cross section A-A' in Fig.1



**Fig. 5** Fabricated device: (a) device size compared with a US penny; (b) cross section of PDMS channel with measured dimensions; (c) fabricated bottom structure with measured dimensions

체의 흐름에 따른 z 축에서의 입자 움직임(Fig. 3)을 통해 예측하였다. Figure 5는 Fig. 1의 A-A' 단면에 대한 본 입자정렬기의 제조공정을 나타낸다. Cr 과 Au 를 선택적으로 식각하여 전극을 형성하고 SU-8 2025 photoresist 패턴으로 절연체 구조물을 형성하였다. 절연체 구조물은 평면전극의 양 끝단에서 약  $35\ \mu\text{m}$  더 길게 설계 하였는데 [Fig. 5(c)], 이는 절연체 구조물과 전극의 길이가 같을 때 전기장의 최소 경로가 전극 가장 자리, 즉 유로 바닥 면에 형성 되는 것을 방지하기 위함이다.

### 4. 성능 시험 및 토의

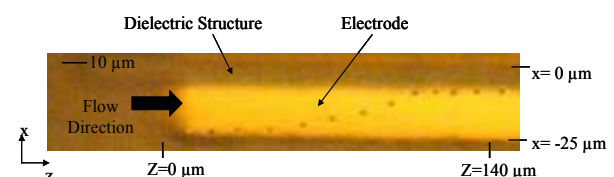
#### 4.1 Particle distribution

제작된 소자의 정렬 유로(focusing channel) 끝단에서 입자의 분포를 측정하기 위해 전기 전도도가  $0.2\ \text{mS/m}$ 인 증류수에  $10^8/\text{ml}$  으로 희석된 지름이  $2\ \mu\text{m}$  폴리스티렌(Polystyrene) 입자를 사용하였다. 인가된 전압 신호는  $15\ \text{kHz}$ ,  $15\ \text{Vp-p}$  사각파를 사용하였고,  $0.01\ \mu\text{l/min}$ 의 유량 조건을 사용하였다.

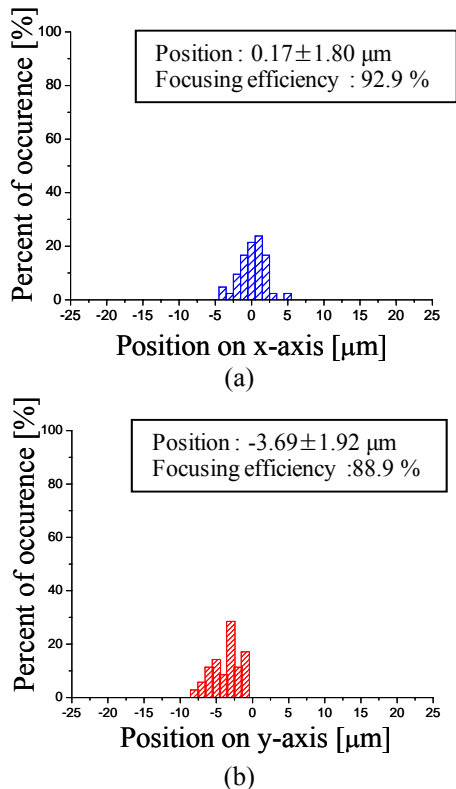
Figure 6는 하나의 입자에 대한 정렬 채널 앞단에서의 이동 궤적이다. 입자들이 전압이 인가된 전극과 절연체 구조물을 지남에 따라 채널 중앙으로 정렬 되는 것을 확인 할 수 있다. Figure 7은 입자들이 정렬 채널을 다 통과한 후의 궤적이다. 전압을 인가하지 않을 때 입자들은 일정하지 않은 분포를 가지고 이동하는 반면 [Fig. 7(a)], 전압이 인가된 정렬 채널을 지난 입자들은 채널의 중앙으로 정렬되어 이동하는 것을 x-z 평면 [Fig. 7(b)]과 y-z 평면[Fig. 7(c)]에서 모두 확인 할 수 있었다.

#### 4.2 Focusing efficiency

Fig. 7는 정렬 유로의 끝 단에서  $20\ \mu\text{m}$  떨어진 지점에서 관찰된 입자의 분포를 x-z 평면(top view)과 y-z 평면(side view)에서 각각 정리한 결과이다. x-z 평면(top-view)에서 정렬된 입자의 평균 위치는  $0.17 \pm 1.80\ \mu\text{m}$  이었으며, y-z 평면(side-view)에는  $-3.69 \pm 1.92\ \mu\text{m}$  로 측정되었다.



**Fig. 6** Particle trajectory for  $2\ \mu\text{m}$ -diameter PS bead on x-z plane (top-view) at the front of focusing channel with the sample flow rate of  $0.01\ \mu\text{l/min}$  and the applied  $5\ \text{kHz}$  square wave of  $15\ \text{Vp-p}$



**Fig. 7** Particle distribution of 2  $\mu\text{m}$ -diameter PS bead at 20  $\mu\text{m}$  away from the end of focusing channel with the sample flow rate of 0.01  $\mu\text{l}/\text{min}$  and 15 kHz square wave voltage of 15  $V_{\text{p-p}}$ : (a) on x-z plane (top-view); (b) on y-z plane (side-view)

이때, 기준이 되는 유로의 중앙의 위치는 0  $\mu\text{m}$  이다. y-z 평면에서 입자들이 유로의 중앙보다 -3.69  $\mu\text{m}$  아래에서 정렬되는 것은 유선이 절연체 구조물을 지난 후 아래로 떨어지는 현상(Fig. 3b)에 의한 것으로 생각되며, 이는 추후 절연체 구조물의 높이를 변경함으로써 유로의 정중앙으로 입자를 정렬할 수 있을 것이라 생각된다.

정렬 효율은 x-z 평면(top view)과 y-z 평면(side view) 모두에서 약 90% 인 것으로 측정되었다. 이는 기존의 상부 및 하부 전극을 동시에 사용하여 입자를 정렬하였을 때의 효율<sup>(3)</sup>보다 개선된 결과이며, 본 연구를 통해 추가적인 유량유입부 없이 하부 전극만을 사용하면서도 유로의 중앙으로 삼차원 입자 정렬이 가능함을 증명하는 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 추가적인 유량 유입부와 채널 상단의 전극 공정 없이 간단하고 효과적인 삼차원 입자 정렬이 가능한 삼차원 입자 정렬기를 제안하였고,

이를 실험적으로 검증하였다. 제안한 정렬기는 2  $\mu\text{m}$ 의 지름을 갖는 PS 입자를 x-z 평면(top view)과 y-z 평면(side view)상에서 각각 90% 이상의 효율로 정렬함을 확인하였다. 이와 같은 입자 정렬기는 다른 분석시스템의 요소들과 집적화하기 적합한 장점을 가지고 있기 때문에 미소 생화학 분석시스템에 널리 사용될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국과학재단 창의적연구진흥사업(디지털나노구동연구단)인 "생체모사 기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구" 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Meinhart, C., Wereley, S. and Gray, S., 2000, "Volume Illumination for Two-Dimensional Particle Image Velocimetry," *Meas.Sci.Technol.* Vol.11, pp. 809~814.
- (2) Groisman, A., 2006, "High-Throughput and High-Resolution Flow Cytometry in Molded Microfluidic Devices," *Anal. Chem.*, Vol.78, pp. 5653~5663.
- (3) Morgan, H., Holmes, D., and Green, N., 2003, "3D Focusing of Nanoparticles in Microfluidic Channels," *IEE Proc.-Nanobiotech.*, Vol.150, No.2, pp. 76~81.
- (4) Cheung, K., Gawad, S. and Renaud, P., 2004, "Microfluidic Impedance Spectroscopy Flow Cytometry: Particle Size," *Proc. 17th MEMS 2004*, Maastricht, The Netherlands, pp. 343~346.
- (5) Wang, Z., El-Ali, Z., Engelund, M., Gotsæd, T., Perch-Nielsen, I., Mogensen, K., Snakenborg, D., Kutter, J. and Wolff, A., 2004, "Measurements of Scattered Light on a Microchip Flow Cytometer with Integrated Polymer Based Optical Elements," *Lab chip.*, Vol.4, pp. 372~377.
- (6) Sundararajan, N., Pio, M., Lee, L., and Berlin, A., 2004, "Three-Dimensional Hydrodynamic Focusing in Polydimethylsiloxane (PDMS) Microchannels," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol.13, No.4, pp. 599~566
- (7) Yu, C., Vykoukal, J., Vykoukal, D., Schwartz, J., Shi, L. and Gascoyne, P., 2005, "A Three-Dimensional Dielectrophoretic Particle Focusing Channel for Microcytometry Applications," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol.14, No.3, pp. 480~487.
- (8) Holmes, D., Morgan, H. and Green, N., 2006, "High Throughput Particle Analysis: Combining Dielectrophoretic Particle Focusing with Confocal Optical Detection," *Biosensor and Bioelectronics*, Vol.21, pp. 1621~1630.
- (9) Hughes, M., 2000, "AC Electrokinetics Applications for Nanotechnology," *Nanotech.*, Vol.11, pp.124~132.