

&lt;학술논문&gt;

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.10.845>ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 사중극자 유전영동 트랩에서의 입자의 동특성에 관한 연구

니치 찬드라세카란\* · 이은희\*\* · 박재현\*\*\*\*

\* 경상대학교 기계항공공학부 대학원, \*\* 경상대학교 항공우주특성화대학원

\*\*\* 경상대학교 항공우주시스템공학과, 항공기부품기술연구소

## Analysis of Particle Motion in Quadrupole Dielectrophoretic Trap with Emphasis on Its Dynamics Properties

Nichith Chandrasekaran\*, Eunhui Yi\*\* and Jae Hyun Park\*\*\*\*

\* Graduate School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

\*\* Graduate School of Specialized Aerospace Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

\*\*\* Dept. of Aerospace and System Engineering, Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received May 14, 2014 ; Revised August 7, 2014 ; Accepted August 18, 2014)

**Key Words:** Dielectrophoresis(유전영동), Quadrupole Trap(사중극자 트랩), Paul Trap(Paul 트랩), Mathieu Equation(Mathieu 방정식), Clausius-Mossotti Factor(Clausius-Mossotti 인자), Critical Frequency(임계주파수), 반응주파수(Responding Frequency)

**초록:** 유전영동(DEP)이란 비균질의 전기장과 그에 따라 입자 내부에 형성되는 극성힘에 의해 용매에 분산되어 있는 입자에 야기되는 운동을 의미하며, 세포, 바이러스, 나노입자 등의 트래핑, 입자분류, 셀 분리 등과 같은 다양한 생물학적 응용에 이용되어 왔다. 지금까지 유전영동트랩에 대한 해석은 주기평균 ponderomotive force 에 기반한 정특성 해석이 주를 이루고 있으며, 동특성에 대해서는 많은 연구가 이루어져 있지 않다. 이는 지금까지 유전영동트랩이 적용된 입자들의 크기가 상대적으로 매우 크기 때문으로, 분석입자의 크기가 매우 작은 나노단위 분석에서는 적절하지 않다. 본 연구에서는, 다양한 시스템 파라미터들에 대한 트래핑의 동역학적 반응 및 그들의 트래핑 안정성에 대한 영향을 심도있게 관찰하고자 한다. 특히, 입자의 전도율에 따른 입자의 동특성의 변화 또한 관찰하고자 한다.

**Abstract:** Dielectrophoresis (DEP) is defined as the motion of suspended particles in solvent resulting from polarization forces induced by an inhomogeneous electric field. DEP has been utilized for various biological applications such as trapping, sorting, separation of cells, viruses, nanoparticles. However, the analysis of DEP trapping has mostly employed the period-averaged ponderomotive forces while the dynamic features of DEP trapping have not been attracted because the target object is relatively large. Such approach is not appropriate for the nanoscale analysis in which the size of object is considerably small. In this study, we thoroughly investigate the dynamic response of trapping to various system parameters and its influence on the trapping stability. The effects of particle conductivity on its motion are also focused.

- 기호설명 -

 $\bar{F}$  : 유전영동력 $\epsilon_m$  : 매질의 유전율 $\epsilon_p$  : 입자의 유전율 $\sigma_m$  : 매질의 전도계수 $\sigma_p$  : 입자의 전도계수 $a$  : 입자의 반지름 $\omega$  : 가진주파수 $E_0$  : 외부전기장의 크기 $f_{CM}$  : Clausius-Mossotti 인자

## 1. 서 론

직접적인 접촉 없이 원격으로 부유입자를 조작할 수 있는 능력은 미시체계기술의 응용에 있어 커다란 잠재력을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 이전의 연구들은

† Corresponding Author, parkj@gnu.ac.kr

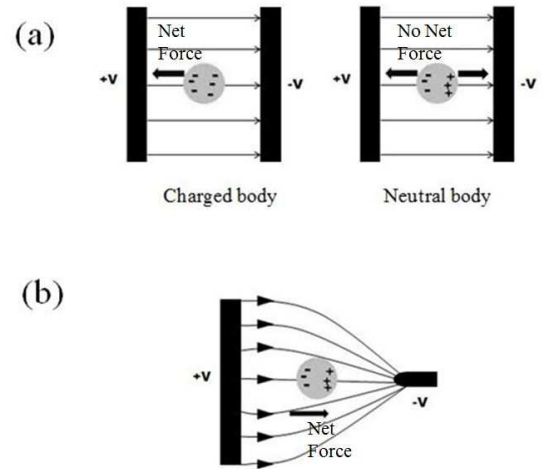
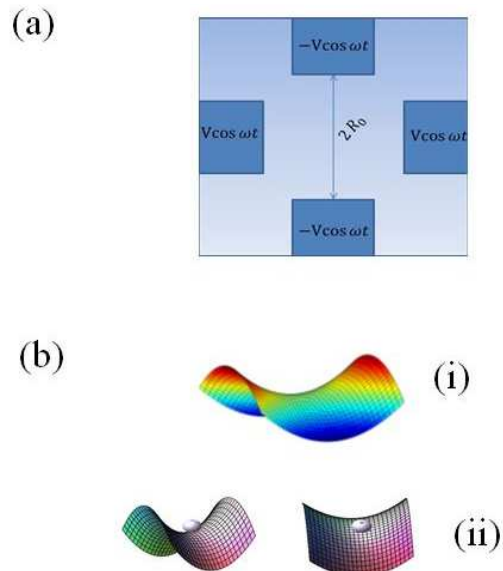
© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Properties of the particles under investigation

Properties	Particle A	Particle B
$\epsilon_p$	2.55	2.55
$\epsilon_m$	78.5	78.5
$\sigma_p$ (S/m)	0.01	0.003
$\sigma_m$ (S/m)	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$

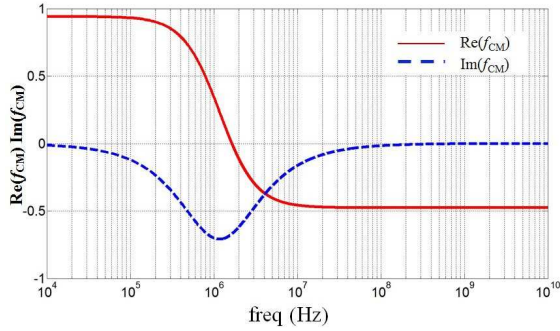
전기영동(electrophoresis, EP)과 유전영동(dielectrophoresis, DEP)을 포함하고 있는 수용액에서 작은 입자들을 전기력을 이용하여 조작할 수 있음을 보여준다<sup>(2)</sup>. 전기영동은 외부전기장이 있는 입자들의 고정비의 상호작용(Fig. 1(a) 참조)이며 유전영동은 하전되지 않은 극성을 가진 작은 입자에서 균일하지 않은 전기장에 의해 영향을 받는 힘을 나타낸다(Fig. 1(b) 참조).<sup>(3,4)</sup> 특히, 유전영동은 교류 전기장에서 작동하기 때문에 전극에서의 전기분해나 전기분극화 영향 등의 문제가 생기지 않는 것으로 알려져 있다. 마이크로스케일의 유전영동을 이용한 응용에서 중요한 분야 중의 하나는 전기적 특성의 차이에 기반한 입자분리장치를 만드는 것으로. 입자 반지름이나 전기적 특성의 차이점에 따른 유전영동력(dielectrophoretic force)의 변화를 이용하는 것으로,<sup>(5-8)</sup> 국내외에서 이에 대한 많은 연구가 있어 왔다.<sup>(9,10)</sup> 유전영동을 이용한 또 다른 주요한 연구분야는 본 연구에서 다루고자 하는 입자트랩(particle trap)이다.<sup>(11,12)</sup> 단일입자나 콜로이드 입자들은 각각의 개별적인 특성을 파악하는 것이 중요한데, 트래핑을 통해 이를 구현할 수 있으며, 이는 미래의 단분자분석기술(single molecule analysis)로 가는 중요한 과정이 될 것으로 사료된다. 이러한 목적을 위하여 가장 일반적으로 사용되는 트랩이 사중극자 트랩(quadrupole trap)이다. 유전영동을 이용한 입자의 조작이 가능하기 위해서는 입자의 유전율이 매질의 것과는 상이해야 한다.

현재 유전영동을 이용한 입자들의 운동제어, 세포포집, 박테리아의 선택적 분리등과 같은 생의학적인 응용에 많은 연구가 이루어지고 있지만,<sup>(2)</sup> 유전영동 해석의 경우에는 주기평균된 ponderomotive force를 이용하는 등 동특성을 분석하는 것에는 소홀해 왔다. 현재까지의 연구는 백혈병세포( $6.25 \mu\text{m}$ ), 이스트( $4.8 \mu\text{m}$ ), 대장균( $1 \mu\text{m}$ ), 바이러스( $0.25 \mu\text{m}$ ) 등 생명공학에서 나타날 수 있는 생체입자들의 크기를 고려하여 주로 크기가 큰 입자( $0.1\text{-}10 \mu\text{m}$ )들에 대해 집중해 왔으므로,<sup>(13)</sup> 그 효과가 그다지 중요하지 않았지만, 나노단위 입자 등 미래의 초소형분석기술

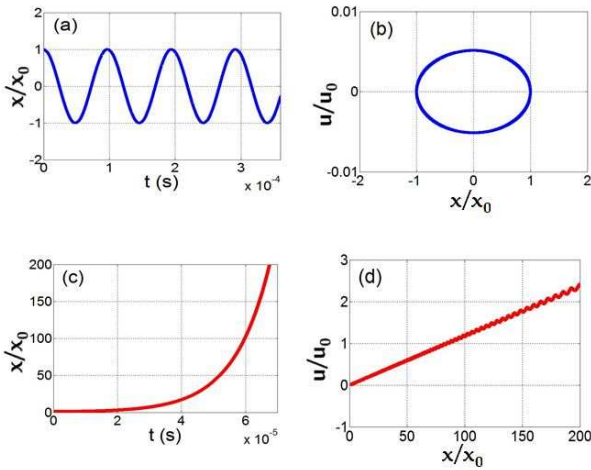
**Fig. 1** (a) Electrophoresis (b) Dielectrophoresis**Fig. 2** (a) Geometry of quadrupole trap (b) (i) E-field and (ii) object in trap

에 적용하기 위해서는 동특성의 이해가 반드시 요구된다. 입자의 움직임을 야기하는 유전영동력은 가진주파수, 전기장의 공간적 분포, 매질의 유전특성, 그리고 트래핑하고자 하는 입자의 유전특성 등의 함수로 주어진다. 본 연구는 사중극자 유전영동 트랩의 안정성 및 동특성을 이론적으로 분석하고, 다양한 시스템 파라미터의 영향을 규명하는 것을 목적으로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 유전영동에 대한 기초이론과 사중극자 트랩에서의 유전영동 이론에 대해서 설명하고, 3 절에서 가진전기장의 주파수, 전압, 그리고 트랩의 크기 같은 다양한 시스템 변수의 의한 시스템 동특성 변화에



**Fig. 3** Clausius-Mossotti factor plot showing the critical frequency (1.65 MHz) for a polystyrene bead (p) embedded in DI (de-ionized) water (m) whose properties are given in Table.1



**Fig. 4** (a) The trajectory of Particle A (see Table 1) at frequency of 2 MHz (b) Phase plot at frequency 2 MHz (c) Trajectory of particle at frequency 1.2MHz (d) Phase plot at frequency 1.2MHz

대해 살펴보았다. 그리고, 4 절에서 결론에 대한 고찰을 제시하였다.

## 2. 이 론

유효쌍극자모델<sup>(4)</sup>에 의하면, 유전영동력은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F} = 2\pi\epsilon_m a^3 \vec{E}_0 \cdot \nabla \vec{E}_0 \times [\text{Re}(f_{CM}) + \text{Re}(f_{CM})\cos 2\omega t + \text{Im}(f_{CM})\sin 2\omega t] \quad (1)$$

$f_{CM}$  은 복소 CM 인자이며 다음 식에 의해 주어진다.

$$f_{CM} = \frac{\tilde{\epsilon}_p - \tilde{\epsilon}_m}{\tilde{\epsilon}_p + 2\tilde{\epsilon}_m} \quad (2)$$

$\tilde{\epsilon}_p$  과  $\tilde{\epsilon}_m$  은 각각 다음 식에 의해 주어진다.

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega} \quad (3)$$

$\epsilon$  은 매질 또는 입자의 유전율이며  $\sigma$ 는 매질 또는 입자의 전도율이고  $j$  는  $\sqrt{-1}$  인 허수 단위다.

사중극자 유전 트랩<sup>(14)</sup>은 Fig. 2(a)에 보이는 것과 같이 서로 다른 전극들에 대해 교류 전압 극성을 띄는 4 개의 전극으로 구성되어있다. 전위의 극성은 1/2 사이클마다 반전된다. 이 것은 입자에 힘을 가하는 교류 전기장의 집중(focusing)과 분산(defocusing)을 만들어내며 이들은 입자를 중심으로 밀거나 혹은 중심으로부터 멀어지도록 잡아당긴다. 전압의 극성 변화가 충분히 빠를 경우, 입자는 고속의 back and forth movement 에 묶이게 되고 Fig. 2(b) (ii)에 나온 것과 같이 중심을 향해 잡아당겨진다.

운동방정식은 식 (1)로부터 다음과 같이 유도할 수 있다. 우선 사중극자에서의 전기장은 다음과 같이 주어진다.

$$E_0 = -\nabla\Phi_0 = \begin{Bmatrix} E_{0x} \\ E_{0y} \end{Bmatrix} = \frac{V_0}{R_0^2} \begin{Bmatrix} -x \\ +y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

식 (1)에 식 (4)를 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{2\pi\epsilon_m a^3 V_0^2}{R_0^4} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \times [\text{Re}(f_{CM}) + \text{Re}(f_{CM})\cos 2\omega t + \text{Im}(f_{CM})\sin 2\omega t] \quad (5)$$

위의 식 (5)를  $\tau = \omega t$  의 무차원 시간을 이용하여 간단하게 정리하면 다음과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \frac{3\epsilon_m V_0^2}{2\rho\omega^2 R_0^4} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} \times [\text{Re}(f_{CM}) + \text{Re}(f_{CM})\cos 2\tau + \text{Im}(f_{CM})\sin 2\tau] \quad (6)$$

입자의 x-운동과 y-운동이 같음을 고려해서, 본 연구에서는 x-방향의 결과만을 나타냈다.

마이크로시스템에서 유전영동은 가진전압, 가진 주파수, 트랩 크기 등의 다양한 시스템 파라미터에 영향을 받는다. Fig. 3 은 주파수에 따른 CM 인자의 변화이다. 그림에서 보이는 것과 같이  $\text{Re}(f_{CM})$  는 저주파에서의 1 부터 고주파에서 -1/2 까지 변화한다. 이러한  $\text{Re}(f_{CM})$  의 부호 변화는,

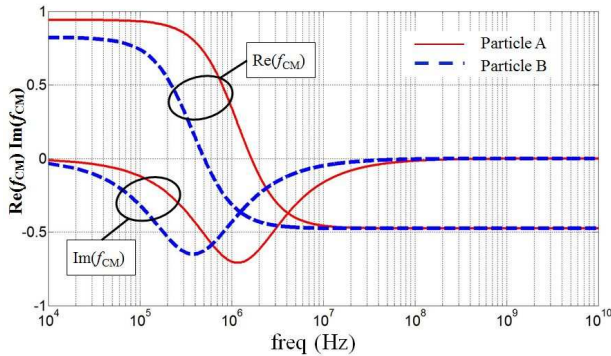


Fig. 5 Clausius-Mossotti plot showing the critical frequency for two different particles (see Table.1)

입자가 고전기장 영역으로 접근하거나 또는 그로부터 멀어지는 현상에 대해 가장 중요한 요소이다. 이에 따라 유전영동은 (i) 입자가 고전기장(high electric field) 영역으로 접근하는 양의 유전영동(pDEP)과 (ii) 입자가 고전기장로부터 멀어지는 음의 유전영동(nDEP)의 두 가지로 분류할 수 있다.

고주파에서 식 (2)의  $\varepsilon$ 은  $\varepsilon$ 로 대체할 수 있으며, 유전영동 효과들은 매질과 입자의 분극화에 의한 유전율로 표현된다. 저주파에서 식 (2)의  $\varepsilon$ 은  $\sigma$ 에 의해 대체될 수 있고 유전영동 효과들은 매질과 입자의 전도율 함수로 나타난다. 임계주파수(critical frequency, 또는 교차주파수 – crossover frequency)는 음의 유전영동이 양의 유전영동으로 바뀌는 주파수를 의미하며, 이에 따라 고전기장 영역으로 입자가 접근하는지 또는 멀어지는지가 결정된다.<sup>(15, 16)</sup>

$\text{Re}(f_{CM})$ 의 주파수 의존성은 입자에 대한 유전영동력의 주파수 의존성을 의미한다. 즉, 유전영동력의 크기와 부호는 전기장 주파수의 함수다. 입자의 유전율  $\varepsilon_p$ 가 매질의 유전율  $\varepsilon_m$ 보다 크고 입자의 전도율  $\sigma_p$ 보다 매질의 전도율  $\sigma_m$ 이 작으면  $\text{Re}(f_{CM})$ 는 저주파에서 음의 값을 가지며, 고주파에서 양의 값을 가진다. 반대로,  $\varepsilon_p < \varepsilon_m$ 이고  $\sigma_p > \sigma_m$ 인 경우에는  $\text{Re}(f_{CM})$ 가 저주파에서 양, 고주파에서 음의 값을 가진다. 매질의 전도율과 가진주파수의 변동에 의해 입자의 유도 유전영동 거동(induced dielectrophoretic behavior)을 시각적으로 관찰할 수 있다.

### 3. 결과 및 토의

이 연구에서 고려한 두 종류의 입자가 Table 1에 주어져 있다. 하나는 반지름이  $1\ \mu\text{m}$ 인 구형 폴리스틸렌 입자(Particle A)고 다른 하나는 전기 전도율을 제외한 다른 특성들이 입자 A와 같은

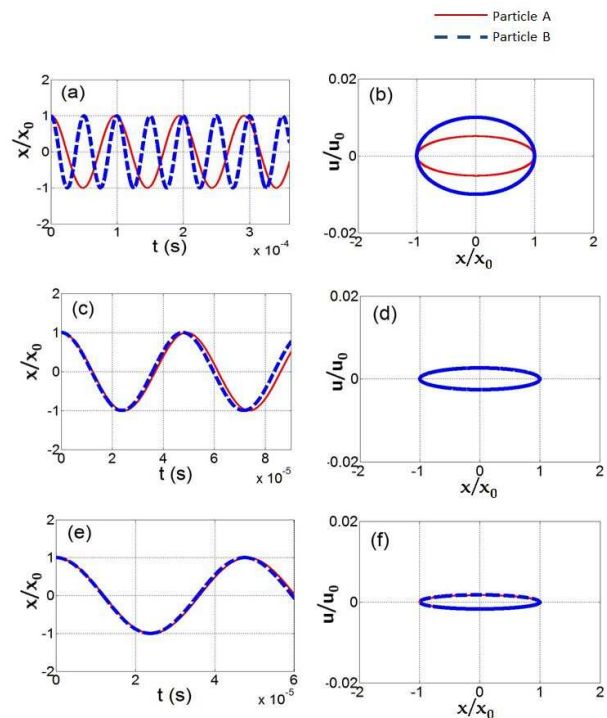
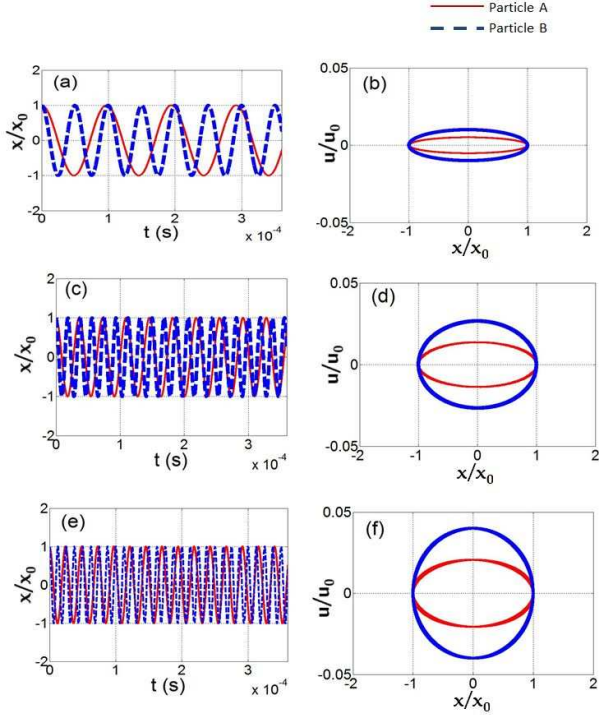


Fig. 6 (a), (b) The trajectory and phase plot of Particles A and B at frequency of 2 MHz (c), (d) The trajectory and phase plot of the particles at frequency 8 MHz (e), (f) The trajectory and phase plot of the particles at frequency 12 MHz

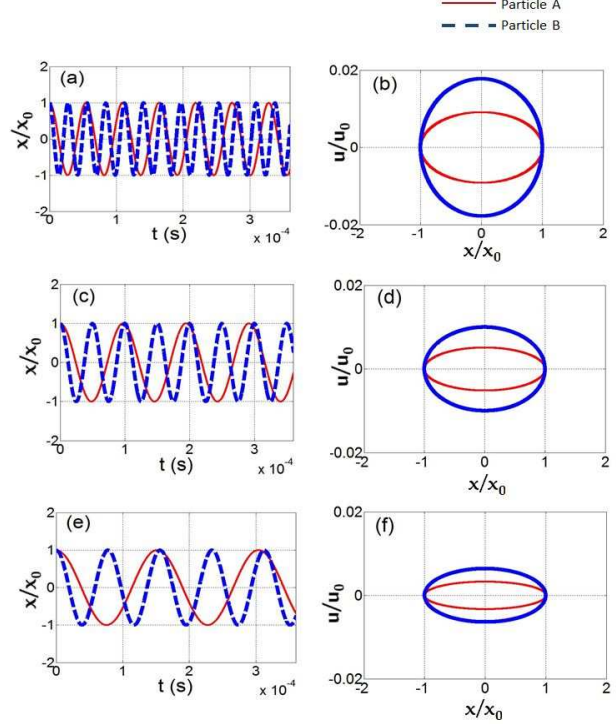
가상의 입자(Particle B)다. 입자 B의 전기 전도율은 입자 A의 30 %인  $0.003\ \text{S/m}$ 로 가정하였다. 가진 교류 전기장은 트랩크기( $R_0$ )가  $4.0\ \mu\text{m}$ 인 사중극자트랩 전극 배열에 의해 형성되었으며, 가해진 전압의 크기는  $3\ \text{V}$ 로 일정하게 유지하였다. 1.2와 2.0 MHz인 두 대표주파수들에서의 입자 A의 거동을 Fig. 4에 나타내었다. Figs. 4(c)와 4(d)에서는 주파수가 1.2 MHz이며, 이는 임계주파수 아래이고 Figs. 4(a)와 4(b)는 주파수가 2.0 MHz이며, 이는 임계주파수 위의 주파수이다. 본 연구에서 입자의 궤적은 MATLAB의 4차 Runge-Kutta 방식을 이용한 운동방정식(식 6)의 풀이에 의해 얻어진다.

Figs. 4(a)와 4(b)에 나와있듯이, 음의 유전영동 영역에서 입자는 조화운동을 하며 위상 plot은 폐쇄루프(이 경우는 타원형)이다. 하지만,  $\omega = 2\ \text{MHz}$ 의 가진주파수에 비해 조화운동을 하는 궤적의 주파수는  $0.01\ \text{MHz}$ 로 매우 상이하며, 이는 다음과 같은 이유 때문이다:  $\omega = 2\ \text{MHz}$ 에서 CM 인자의 실수부는 무시할 수 있는 정도가 되어 운동방정식은  $\ddot{x} = \frac{3\varepsilon_m V_0^2}{2\rho\omega^2 R_0^4} [\text{Im}(f_{CM}) \sin 2\tau] x$ 로 간략화된다. 본 수식과 Paul 트랩의 Mathieu's equation 사이의 상사성





**Fig. 7** (a), (b) The trajectory and phase plot of Particle A and B at voltage of 3 V. (c), (d) The trajectory and phase plot of the particles at voltage of 8 V. (e), (f) The trajectory and phase plot of the particles at voltage of 12 V



**Fig. 8** (a), (b) The trajectory and phase plot of Particle A and B at trap size of 6  $\mu\text{m}$ . (c), (d) The trajectory and phase plot of the particles at trap size of 8  $\mu\text{m}$ . (e), (f) The trajectory and phase plot of the particles at trap size of 10  $\mu\text{m}$

으로부터 궤적의 secular motion 은 거의  $\frac{\omega}{2} \sqrt{-\frac{3\varepsilon_m V_0^2}{2\rho\omega^2 R_0^4} \text{Im}(f_{CM})} \cong 5.9 \times 10^{-3} \text{ MHz}$  의 주파수로만 예측되는데<sup>(17)</sup> 이 값은 현재 관찰되는 0.01 MHz 의 반응주파수(responding frequency) 값과 유사하다. 이 경우  $\omega$  로 진동하는 micro-motion 은 나타나지 않는다. 양의 유전영동 영역에서는 입자의 궤적과 속도가 Figs. 4(c)와 4(d)에서 보는 바와 같이 발산한다. 즉, 입자가 전극을 향해서 움직이며 트랩에 트래핑되지 않는다.

CM 인자는 입자의 특성에 의해 결정된다. 서로 상이한 유전성질을 가진 입자들은 서로 다른 임계주파수 값을 가진다. Fig. 5 는 A, B 입자에 대하여 가진주파수에 따른  $f_{CM}$  값의 변화를 서로 비교하였다. 두 입자는 서로 상이한 임계주파수를 가지며, 일정구간 ( $500 \text{ kHz} < f < 1.62 \text{ MHz}$ )에서는 입자 B 가 음의 유전영동을 경험하는 반면에 입자 A 는 양의 유전영동을 경험한다. 이를 이용한 입자 분리 또한 가능하다.

### 3.1 주파수 효과

3 개의 서로 다른 주파수(2, 8 and 12 MHz)에서의

궤적과 위상 plot 들에 대한 비교가 Fig. 6 에 주어져 있다. 주파수들은 모두 임계주파수 위가 되도록 선택되었다. 입자 A 에서는  $\omega$  가 2 에서부터 8 MHz 까지 증가함에 따라, 반응주파수가 0.01 에서 0.02 MHz 까지 증가하지만, 주파수가 더 증가하여 12 MHz 가 되어도 입자의 움직임은 더 이상 변화하지 않는다. 고주파 같은 영역에서 식 (6)의 우변의  $\text{Re}(f_{CM})$ 를 포함한 상수부가  $\text{Re}(f_{CM})\cos(2\tau)$ 와  $\text{Im}(f_{CM})\sin(2\tau)$ 보다 훨씬 큰 값을 가지기 때문에  $\omega$ 의 변화에 더 이상 의존하지 않는다.(Fig. 5 참조). 따라서, 식 (7)과 같이 secular motion 에 대한 반응주파수는 근사적으로  $\frac{\omega}{2} \sqrt{-\frac{3\varepsilon_m V_0^2}{2\rho\omega^2 R_0^4} \text{Re}(f_{CM})}$  으로 표현할 수 있다. 그리고, 이 관계식을 이용하면  $\omega$  가 8 MHz 와 12 MHz 인 경우 각각에 대하여 반응주파수가 0.04 MHz, 0.06 MHz 로 예측된다. 또한, 시뮬레이션에서 따르면 반응주파수는 두 경우 모두 거의 0.05 MHz 로 관찰되어 secular motion 에 의한 이론적인 예측과 거의 일치한다(Figs. 6. (c) 및 (d) 참조). 입자의 속도가 출력 주파수에 비례하기 때문에 위상 plot 에서의 루프는  $\omega$ 의 증가에 의해

보다 납작한 타원이 된다.

입자 B 와 같은 저전도성 입자들에 대해서는 임계주파수는 0.5 MHz 로 전도성 A 입자의 경우에 비하여 상당히 낮은 값을 가지므로, B 입자에 2 MHz 의 가진주파수를 가하는 경우, 유전영동력이 크기를 결정하는  $\frac{\omega}{2} \sqrt{\frac{3\epsilon_m V_0^2}{2\rho\omega^2 R_0^4} \text{Im}(f_{CM})}$  의 공헌은 거의 무시할 수준이 된다. 따라서, 출력 신호는  $\omega$  의 변화에 둔감하다.

### 3.2 전압효과

3, 8, 12 V 의 서로 다른 세가지 전압에 대하여, 음의 유전영동을 가지는 경우(가진주파수가 2MHz 로 주어짐) 입자의 동역학에 대한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. Fig. 4 에서와 마찬가지로 유전영동력이  $V_0^2$  에 비례하기 때문에  $V_0$  의 증가에 따라 secular frequency 가 증가하였다. 또한, 위상 plot 의 루프가 위아래로 늘어나게 된다. 흥미롭게도 저전도성 입자는 실수부와 허수부 모두 유전영동력에 영향을 끼치기 때문에 유효전압의 변화에 보다 민감하다. 이와는 달리 전도성 입자 A 의 경우, 오직 허수부만이 영향을 끼친다.

### 3.3 트랩크기 효과

마지막으로 Fig. 8 에서는 일정한 주파수(2MHz) 에서 다른 크기( $6\mu\text{m}$ ,  $8\mu\text{m}$ , and  $10\mu\text{m}$ )의 트랩들에 대한 입자의 동역학을 관찰하였다. 전압과는 반대로 유전영동력은  $R_0^4$  에 반비례한다. 따라서, 트랩의 크기 증가는 secular frequency 의 감소를 촉진시키며 위상 plot 의 루프를 납작한 타원으로 만든다. 트랩 크기의 영향은 3.2 절에서 설명된 바와 같이 저전도성 입자에서 보다 중요하게 나타난다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 사중극자 유전영동 트랩에 트래핑된 입자의 가진전기장, 가진주파수, 전압, 트랩 크기 등과 같은 시스템 파라미터의 변화에 대한 동적 반응에 대해 살펴보았다. 각 시스템 파라미터에 대해서 서로 다른 전기 전도율을 지닌 두 종류의 입자를 고려했다. 본 연구에서 발견한 바를 요약하면 다음과 같다.

(1) 가진주파수가 임계주파수보다 큰 경우(음의 유전영동), 입자는 조화 운동을 하며 트랩의 안정성을 달성한다.

(2) 가진주파수가 임계주파수보다 작은 경우(양의 유전영동), 입자 운동은 발산하며 안정한 입자

의 트래핑을 달성하지 못한다.

(3) 저전도성 입자의 경우, 임계주파수는 저주파로 이동한다.

(4) 임계주파수 근처의 가진주파수를 가진 안정 트랩은 micromotion 은 나타나지 않으며 오직 secular motion 만이 나타난다. 주파수의 증가에 따라 반응주파수 또한 증가한다.

(5) 가진주파수가 충분히 높을 때, 시스템은 주파수의 변화에 둔감해진다.

(6) 트랩 크기가 증가함에 따라 반응주파수는 감소하지만, 가진전압이 증가함에 따라 반응주파수는 증가한다.

(7) 위상 plot 은 저전도성 입자에 있어 주파수, 전압, 트랩크기 등과 같은 시스템 파라미터에 보다 민감하다.

본 연구에서는 유체에 의한 댐핑과 입자의 랜덤 운동은 고려되지 않았다. 이후 연구에서는 유체 저항과 랜덤운동을 모두 고려한 경우 트랩의 안정성과 동특성 분석을 수행하고자 한다.

## 후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2012R1A1A1042920).

## 참고문헌 (References)

- (1) Çetin, B. and Li, D., 2011, "Dielectrophoresis in Microfluidics Technology," *Electrophoresis*, Vol. 32, pp. 2410-2427.
- (2) Voldman, J., 2006, "Electrical Forces for Microscale Cell Manipulation," *Annual Reviews of Biomedical Engineering*, Vol. 8, pp. 425-454.
- (3) Jones, T. B., 1995, *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, New York.
- (4) Kirby, B. J., 2010, *Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics Transport in Microfluidic Devices*, Cambridge University Press, New York.
- (5) Wang, X.-B., Huang, Y., Gascoyne, P. R. C. and Becker, F. F., 1997, "Dielectrophoretic Manipulation of Particles," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 33, No. 3, pp. 660-669.
- (6) Morgan, H., Hughes, M. P. and Green, N. G., 1999, "Separation of Submicron Bioparticles by Dielectrophoresis," *Biophysical Journal*, Vol. 77, pp. 516-525.
- (7) Kadaksham, J., Singh, P. and Aubry, N., 2006, "Manipulation of Particles Using Dielectrophoresis," *Mechanics Research Communications*, Vol. 33, pp. 108-122.

- (8) Kwon, J.-S., Maeng, J.-S. and Song, S., 2007, "Development and Validation of Numerical Program for Predicting Electrokinetic and Dielectrophoretic Phenomena in a Microchannel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 31, No. 4, pp. 320~329
- (9) Chang, S. and Cho, Y.-H., 2008, "A Continuous Particle-size Sorter Using Negative a Dielectrophoretic Virtual Pillar Array," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 32, No. 11, pp. 824~831
- (10) Han, S.-I., Joo, Y.-D. and Han, 2012, K.-H., "Deterministic Lateral Displacement as a Function of Particle Size Using a Piecewise Curved Planar Interdigitated Electrode Array," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 3, pp. 241~249
- (11) Jang, L.-S., Huang, P. H. and Lan., K. C., 2009, "Single-cell Trapping Utilizing Negative Dielectrophoretic Quadrupole and Microwell Electrodes," *Biosensors and Bioelectronics*, Vol. 24, pp. 3637~3644.
- (12) Li, W. H., Sun, J., Liu, B. and Zhang, X. Z., 2007, "Simulation Study of Quadrupole Dielectrophoretic Trapping," *Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics*, pp. 1~7.
- (13) Voldman, J., 2006 "Dielectrophoretic Trap for Cell Manipulation," In *BioMEMS and Biomedical Nanotechnology IV: Biomolecular Sensing, Processing and Analysis*, M. Ferrari, R. Bashir and S. Wereley (Eds.), Springer, New York, pp. 159~186.
- (14) Paul, W., 1990, "Electromagnetic Traps for Charged and Neutral Particles," *Reviews of Modern Physics*, Vol. 62, No.3, pp. 531~540.
- (15) Voldman, J., Braff, R. A., Toner, M., Gray, L. M. and Schmidt, M. A., 2001, "Holding Forces of Single-Particle Dielectrophoretic Traps," *Biophysical Journal*, Vol. 80, pp. 531~541.
- (16) Rosenthal, A., Taff, B.M. and Voldman, J., 2006, "Quantitative Modeling of Dielectrophoretic Traps," *Lab on a Chip*, Vol. 6, pp. 508~515.
- (17) Berkland, D. J., Miller, J. D., Bergquist, J. C., Itano, W. M. and Windland, D. J., 1998, "Minimization of Ion Micromotion in a Paul Trap," *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, pp. 5025~5033.