

## 전기 영동에서의 입자간의 전기력에 의한 상호 작용

이호림\* · 강관형\*\*

### Dielectric Interaction of Particle in Electrophoresis

Horim Lee\* and Kwan Hyoung Kang\*\*

**Keywords :** Electrophoresis (전기영동), Dielectrophoresis (유전영동), Particle (입자), Electric Field (전기장), Aggregation (응집)

#### Abstract

When two particles close to each other are in electrophoretic motion, each particle is under the influence of the non-uniform electric field generated by the other particle. Two particles may attract or repel each other due to the dielectric force depending on their positions in the non-uniform electric field. It is shown analytically that two adjusting rigid particles can form an aggregate due to the dielectric interaction. To verify the validity of the theoretical prediction, an experiment is carried out by using a microchannel. In the experiment, AC electric field is used to eliminate cumbersome electroosmotic flow. The experimental result shows that the particles form a chain-like structure, which is typically observed in electro-rheological fluid, due to the dielectric interaction.

#### 1. 서론

모세관 전기영동법은 (capillary electrophoresis) 입자들 간의 zeta 전위의 차이로 인해 발생하는 입자들의 이동 속도차를 이용하여 입자들을 분리하는 기술이다. 모세관 전기영동법은 생화학분석에 있어서 가장 기본적인 도구로써 DNA, 미세 입자, 이온 등의 불리와 성분 분석에 두루 사용되고 있다. 전기영동 장치는 보통 입자가 일정 지역을 지나는 것을 광학적인 방법이나 또는 전도도를 사용하여 검출하게 된다. 그런데 입자들이 같은 속도로 움직이더라도 모세관의 굽음, Joule heating 등의 이유로 인하여 소위 dispersion 이 일어나게 되어 시간에 따른 검출 신호의 그래프가 (electropherogram) broad 한 양상을 나타내는 것이 보통이다.

그런데 기존의 여러 문헌에 의하면 이와 같은 입자들이 전기영동 과정 중에 매우 폭이 가는 peak 가 관찰되고 있다 [1]. 그런데, 예를 들어 광학적인 검출 방법에서는 신호의 강도는 입자의 밀도 혹은 크기에 비례하므로 이러한 폭이 가는 peak 는 커다란 응집체가 검출 위치를 지나는 것으로 해석될 수 있다. 이러한 peak 는 정자 세포, 크로모솜, DNA 와 같은 다양한 생화학 입자에 대하여 나타나고 있다 [1]. 그런데 아직까지 이와 같은 응집체가 어떻게 형성되는가에 대해서는 분명하게 설명된 바가 없다.

운동 중에 있는 입자가 응집체를 형성하기 위해서

는 무엇보다 입자가 어떠한 방식으로든 서로 가까이 다가와야 한다. 비교적 멀리 떨어져 있던 입자가 서로 가까이 인접하게 될 수 있는 요인으로는 속도 차에 의한 충돌 (electrokinetic collision), 순수 유체역학적인 힘의 작용 (hydrodynamic interaction), 전기력의 작용 (dielectric interaction) 등을 생각해 볼 수 있다. 그 중 속도차에 의한 충돌로 인한 방식은 상당히 가능성이 있는 것이 되겠으나 이 방식은 속도가 동일한 입자간에 응집체가 형성되는 것을 설명하진 못한다.

최근에 Kang and Li [1]는 비교적 멀리 떨어져 있는 입자들이 전기적 상호 작용에 의해서 응집체를 형성할 수 있음을 이론적으로 입증한 바 있다. (한편, 그들은 또한 유체역학적인 힘은 전기력에 비하여 일반적인 조건에서 매우 작음을 입증 하였다). 그간 본 연구자들은 Kang and Li [1]의 이론을 검증하기 위한 실험을 수행하여 왔고 본 논문을 통하여 현재까지 얻어진 결과를 보고하고자 한다.

#### 2. 이론적 배경

먼저 Fig. 1과 같이 전기장 하에 있는 두 개의 동일한 크기와 zeta 전위를 갖는 고체 입자를 고려해 보자. 편의상 입자는 구형 입자라 가정한다. 외부의 유체는 전해질로 가정한다. 입자는 전하를 띄고 있고 이로 인하여 입자의 표면에는 전기 이중층 (electrical double layer)이 덮고 있다. 이 때 소위 전기 이중층의 차폐 효과(screening effect)로 인해 입자로는 전류가 흐르지 못하고 겹보기로는 입자는 마치 절연체와 같이 여겨질 수 있다.

\* 포항공과대학교 기계공학과 대학원, masher@postech.ac.kr

\*\* 포항공과대학교 기계공학과, khkang@postech.ac.kr

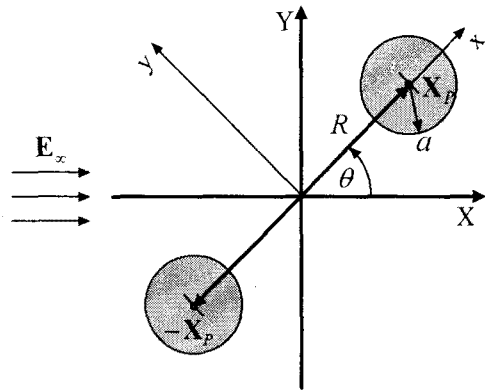


Fig. 1 A pair of identical spherical particles submerged in an electrolyte medium under an externally applied uniform electric field  $E_x$ .

입자의 가운데를 이은 선분의 중앙점에 입자와 함께 이동하는 두 종류의 좌표계를 설정한다. 이 중 (X,Y) 좌표계는 입자에 가해지는 전기장 방향에 각각 평행하고 수직인 방향을 그 성분으로 갖는다. 그리고 (x,y) 좌표계는 각각의 입자의 가운데 지점을 연결한 직선에 평행하고 수직인 방향을 성분으로 갖는다.

두 개의 입자는 외부에서 주어진 전기장을 교란하게 된다. 따라서 각각의 입자는 1) 외부에서 주어진 균일 전기장, 2) 상대편 입자에 의하여 교란된 전기장, 3) 그리고 자신에 의해서 교란된 전기장의 세 성분의 영향하에 있다고 볼 수 있다. 그런데 이러한 상태에 있어서 전기장은 입자 주변의 전기이중층 내의 이온에 힘을 가하여 입자 주위에 전기삼투 유동 (electroosmotic flow)을 일으키고 이로 인해 입자에 작용하는 유체력을 발생시킨다. 그러나 기존에 의하면 이와 같은 전기삼투 유동은 입자가 매우 근접해 있더라도 입자간에 추가적인 상호작용을 발생시키지 않는다. 즉, electrokinetics 측면에서는 각각의 입자는 옆에 있는 입자에 의하여 아무런 영향을 받지 않는다 [1].

한편, 잘 알려진 바와 같이 입자가 비균일성 전기장 (non-uniform electric field) 하에 있게 되면 입자는 소위 유전영동력 (dielectrophoretic force)을 받게 된다. 따라서 입자는 전기장의 세기가 큰 방향, 혹은 작은 방향으로 힘을 받게 될 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 각각의 입자는 상대편의 입자에 의해 교란된 비균일 전기장 하에 놓이게 된다. 이로 인하여 입자에는 유전영동력이 작용하게 된다. Figure 2는 두 입자가 세 가지 대표적인 위치에 있을 때 작용하는 힘의 방향을 수치해석적으로 구한 결과를 나타내고 있다. 이 때 힘은 Maxwell 응력을 입자 표면에서 적분해서 얻어 졌다.

최근에 Kang and Li [1]은 이러한 전기력에 의해 상호 작용하는 입자에 대하여 전기장과 운동방정식을 수치적으로 해석하여 입자의 운동을 예측하였다. Figure 3은 그 결과중 일부로써 초기에 전기장의 방향에 대하여 거의 수직인 방향에 위치한 두 개의 입

자(굵은선)가 전기력에 의하여 중첩에는 전기장 방향으로 align하는 것을 보여주고 있다. 그런데 입자가 서로 인력에 의하여 당기게 될 지 혹은 척력이 작용되게 될지는 입자의 초기 위치에 따라서 다르게 된다. Figure 4는 한 개의 입자에 대하여 다른 입자의 위치에 따라서 언제 당기고 미는 지를 나타내고 있다.

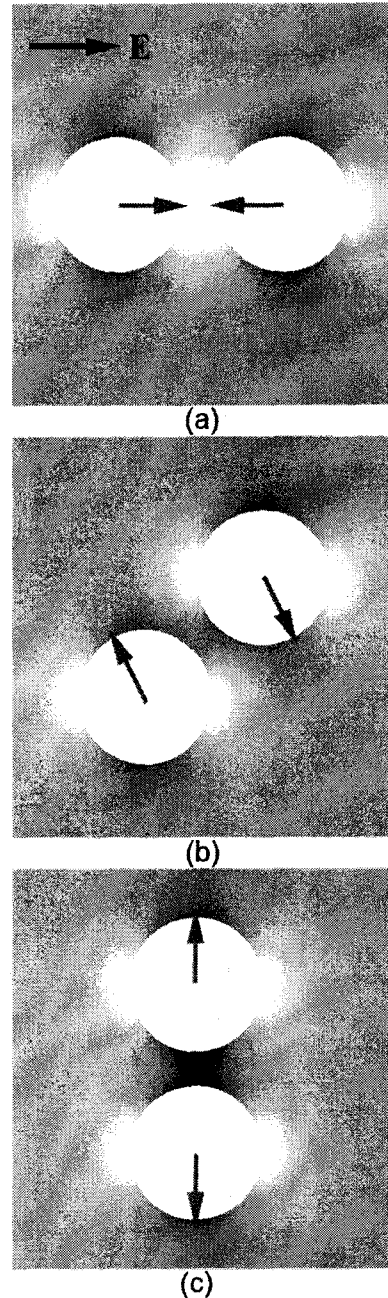


Fig. 2 Computed distribution of  $E^2$  around two spherical particles in a uniform electric field: (a)  $\theta = 0^\circ$ ; (b)  $\theta = 45^\circ$ ; (c)  $\theta = 90^\circ$ . The electric field is directed from left to right for all the cases. The darkness level is proportional to the magnitude of  $E^2$  (i.e., the darker, the stronger), and the arrows schematically indicate the direction of the dielectric force.

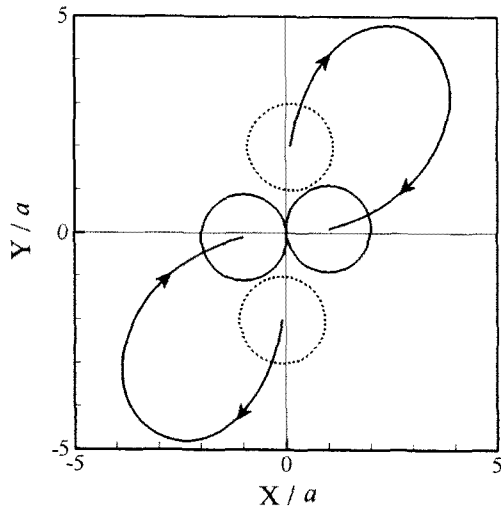


Fig. 3 Trajectory of a pair of particles in which  $(X_0/a, Y_0/a) = (0.1, 2)$ . The dotted and solid circles represent the initial and the final location of the particles. The electric field is from left to right.

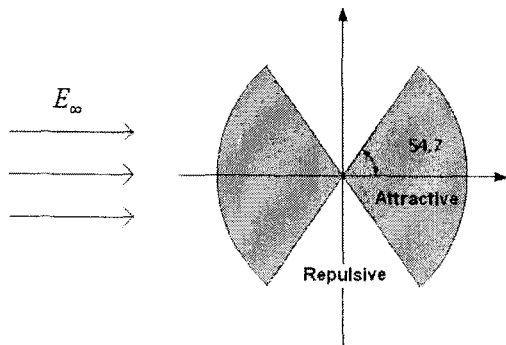


Fig. 4 Schematic diagram for region of attractive and repulsive force.

### 3. 실험

Figure 5는 본 실험에 사용된 실험 장치의 시험부를 보여주고 있다. 실험을 위하여 폭 2mm, 깊이 3mm의 채널을 아크릴과 알루미늄으로 가공 하였다. 도립 현미경(inverted microscope, ZEISS Axiovert200)을 이용하여 입자의 거동을 관측하였고 이미지는 CCD 카메라(Axiocam HSM)를 사용하여 PC에 저장되었다. 실험에는 직경 10  $\mu\text{m}$ 의 입자가 사용되었다. 입자의 수밀도(number density)를 조절하기 위하여 입자가 담겨진 용액 원액을 초순수(de-ionized water)와 대략 1:50 정도로 섞어서 희석을 시켰다.

일반적으로 전기이중층의 두께가 1  $\mu\text{m}$  보다 매우 작을 경우 (본 실험의 경우에 해당) 전기이중층은 외부에서 가해지는 저주파수의 전기장을 완벽하게 차폐하게 된다. 따라서 입자에 작용하는 힘은 비록 AC를 가하더라도 DC 경우와 마찬가지로 앞서 설명한 원리 대로 전기력이 작용하게 된다. 따라서 본 실험에서는 전기삼투 유동을 방지하고 순수히 입자

의 상호 작용만을 관찰하기 위하여 DC 대신 1 kHz 주파수의 AC 전기장을 인가하였다. 인가 전압은 최고 100V까지였으며 이에 따른 전기장의 세기는 최고 50 kV/m 였다.

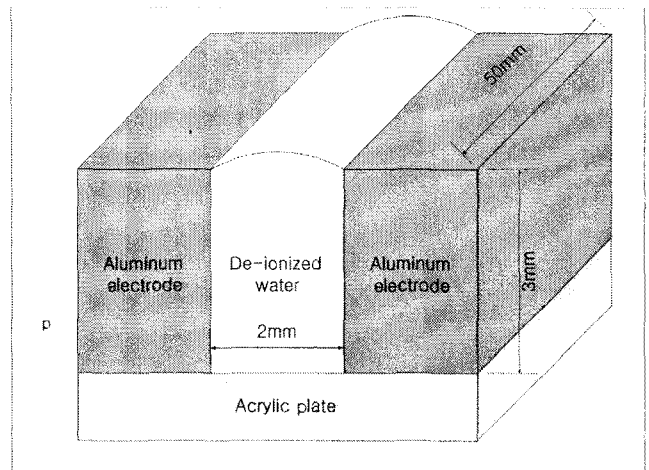


Fig. 5. Schematic diagram of the channel and electrodes.

### 4. 결과 및 토의

전기장을 가하기 전에 입자들은 Fig. 6a에서 볼 수 있는 바와 같이 random하게 분포되어 있다. 그런데 여기에 전기장을 가하게 되면 입자들은 즉시 상호 작용을 개시하게 된다. 그러면서 서서히 Fig. 6b과정을 거쳐 Fig. 6c에서 볼 수 있는 것과 같은 chain 형태를 구성하게 된다. 또한 입자의 chain들은 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전기장의 방향에 대하여 평행한 방향으로 정렬하게 된다. 이러한 chain을 형성한 입자들은 다시 전기장을 off 시킴에 따라 원래의 random 상태로 흩어짐을 보였다.

이와 같이 chain이 형성되는 것은 suspension에 대하여 비균일 전기장을 가했을 때 나타나는 dielectrophoresis의 대표적인 현상과 매우 유사하다. 다만 유의할 것은 본 연구에서는 균일한 전기장을 인가하였고 비균일 전기장 성분은 다른 입자에 의하여 교란된 전기장에 의하여 발생되었다는 점이다. 이러한 chain 형성은 또한 electrorheological (ER) 유체에 대해서 특징적으로 나타나는 것이다. 다만 ER 유체의 경우 전도도가 매우 낮고 전기장의 세기가 훨씬 크다는 차이가 있다. 결국 ER유체에 chain이 형성되는 이유나 본 연구에서와 같이 전도성 유체에서의 chain 형성되는 것은 dielectrophoretic force에 의한 것이란 측면에서 공통점이 있다.

이러한 실험 결과는 앞서의 이론 해석과 일맥상통한 결과를 보여주고 있다. 이를 통하여 우리는 전기영동 하에 있는 입자들이 전기적 상호작용에 의하여 응집체를 형성할 수 있다는 것을 간접적으로 유추할 수 있다.

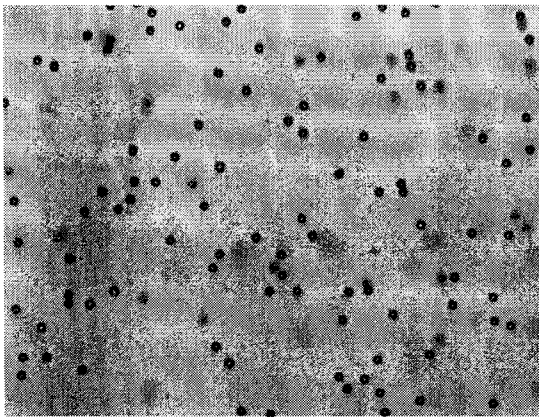
향후의 실험에서는 두 개의 (다른 입자들과는 격리된) 상호작용하는 입자의 궤적을 실험적으로 구하여 앞서 이론적으로 구해진 결과를 보다 엄밀하게 검증해 보고자 한다. 아울러 보다 작은 고체 입자 및 여러 생체 입자 (yeast cells, blood cells, DNA)에 대

하여 비슷한 실험을 수행하고자 한다.

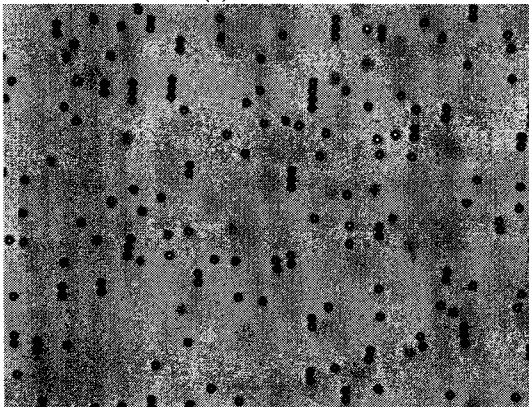
측과 비교하여 이론 해석 결과의 신뢰도를 보다 엄밀하게 검증하고자 한다.

### 참고문헌

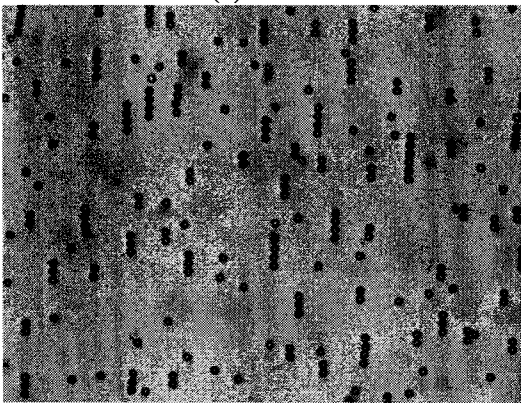
[1]Kang, K. H. and Li, D., 2006, "Dielectric force and relative motion between two spherical particles in electrophoresis," *Langmuir* (American Chemical Society, *Journal of Interface and Colloid*), Vol. 22, No. 4, pp. 1602-1608.



(a) t = 0 min



(b) t = 1 min



(c) t = 2 min

**Fig. 6** Behavior of particles when AC electric field is applied. Particle diameter = 10  $\mu\text{m}$ , AC frequency = 1 kHz. (a) particles are distributed randomly in channel. (b), (c) When an electric field(10kV/m) is applied, particles form aggregates and align parallel to the externally applied electric field and often form long chains.

## 5. 결론

전기영동중에 있는 입자들에 형성되는 응집체의 형성 원리를 파악하기 위한 실험적인 연구를 수행하였다. 이를 통하여 기존의 Kang and Li [1]가 이론적으로 예측한 바와 같이 입자들간의 상호작용에 의하여 입자들이 cluster를 형성할 수 있고 또한 전기장 방향에 평행하게 정렬하게 된다는 것을 확인하였다. 향후에는 입자의 궤적을 실험적으로 구하여 이론 예