

교류 전기습윤에서 부유물의 영향

고성희* · 오정민** · 강관형***

Effect of Suspension in AC Electrowetting

Sung Hee Ko*, Jung Min Oh**, and Kwan Hyoung Kang***

Keywords : Electrowetting (전기습윤), Alternating Current (교류 전류), Particle (입자), Suspension (부유물)

Abstract

We are investigating the effect of particle on electrowetting, and this paper reports the experimental results obtained until now. The experiment was performed for different particle sizes, electrolyte concentration, and AC frequencies. The problem is quite complicated by various factors, such as the existence of surfactant in suspension and sedimentation of particles. We could not draw a concrete conclusion on the effect of particles, and it needs further investigations. We also report interesting phenomena observed during the experiment. It includes the droplet generation at the edge of a droplet, pseudo-bistability of electrowetting, flow generation inside a droplet, and the chain formation of particles inside a droplet.

1. 서론

전기습윤(electrowetting)은 절연 물질 (dielectric material)이 코팅된 전극 위에 놓인 액적(droplet)에 대하여 액적과 전극 사이에 가해진 전위차에 의해 액적의 접촉각(contact angle)이 변하는 현상을 의미한다. 직류 전기장에 의한 전기습윤은 많은 연구가 수행되어 왔다 [1-3]. 전기습윤 현상에 있어서의 접촉각의 변화는 전기적 모세관 현상으로 인한 표면 에너지의 변화, 즉 표면 장력의 변화에 의해 야기되는 것으로 이해되어 왔다 (Lippmann 효과). 비교적 최근에 Kang[3]은 이러한 전기습윤 현상을 열역학이 아닌 전기역학적(electromechanical) 관점으로 재해석하였다. 이를 통하여 전기습윤 현상이 액적의 끝단(edge) 부분에 집중적으로 작용하는 Maxwell 응력 때문이고 이 힘이 마치 표면 장력이 변하는 것처럼 나타남을 보였다.

전기습윤 현상은 미소량의 액체를 미세 유체 기기 등에서 비교적 자유롭게 조절할 수 있는 유용한 전기적 현상이다. 미세 유체의 조절은 이동, 분리, 혼합 등의 복잡한 기계적, 화학적 처리 기능을 포함한다. 그런데 실제 미세유동에 쓰이는 유체는 대체로 단백질이나 DNA, 적혈구 등 부유물을 포함한다. 기존에 Fair 등이[4,5] 전기습윤 현상을 이용하여 디지털 미세 유동 장치를 여러 가지 생물학적 유체의 이동이나 혼합에 응용한 적은 있지만, 부유물이 전기습윤 현상에 끼치는 영향에 대한 연구가 이루어진 예는 거의 전무한 것으로 판단된다.

본 논문에서는 교류 전기장 하에서 폴리스티렌 고분자 입자를 부유물로 사용하여, 비전도성 입자 부유물이 첨가되었을 때 전기습윤의 행태가 어떻게 바뀌는지 파악하고자 시도하였다. 그리고, 전기습윤에 대한 실험을 하면서 부가적으로 얻어

진 몇 가지 흥미로운 사실에 대하여 보고하고자 한다.

2. 실험

실험의 개념도는 Fig. 1에 나타내었다. 스테인레스 스틸 금속판 위에 패럴린(parylene)을 5 μm 두께로 코팅하여 절연층을 만들었고, 표면을 소수성(hydrophobicity) 갖게 하기 위하여 그 위에 AF1600을 약 100nm 두께로 코팅하였다. 파형 발생기(function generator)는 Agilent 33220A 모델을 사용하였으며, 전압 증폭기(voltage amplifier)는 20배까지 증폭이 가능한 FLC Electronics의 A400 모델을 사용하였다. 전극은 80 μm 직경의 백금선(platinum wire)을 사용하였다.

접촉각은 MATLAB을 이용하여 제작된 프로그램을 통하여 구하였다. 이를 위하여 Lumenera Lw295 CMOS카메라를 이용하여 매 조건에서의 액적을 단면에 대한 영상을 기록하였다. 한편, 본 실험에서 사용된 액적의 체적은 5 μl 이다.

직류 전압에 따른 접촉각을 측정할 때는 탈이온화된 물(de-ionized water)을 사용하였고, 고분자 입자를 넣은 부유물 실험에서는 계면활성제가 첨가된 물을 사용하였다. 계면활성제를 사용한 것은 고분자의 표면이 소수성을 띄고 있어, 탈이온화된 물 속에서는 덩어리화되기 때문에 이를 방지하기 위해서이다. 고분자 입자는 발광염료로 염색된 폴리스티렌 입자이고, 크기는 직경 0.8 μm , 밀도는 1.05 g/cm^3 이다.

직류 전기장 하에서 전기습윤 실험은 탈이온화 된 물에 대해 전압을 0 ~ 200 V까지 변화시켜가며 접촉각을 측정하였다. 본 논문에서 전압은 제곱평균 전압(root-mean-square voltage)을 의미한다. 이 실험 결과는 전기습윤 현상에서 접촉각과 입력 전압의 관계를 표현하는 Lippmann-Young 식과 비교하였다.

부유물의 영향을 보기 위해서 무게 농도 0, 0.01, 0.05, 0.1 wt%의 현탁액에 교류 전기장을 인가한 후 접촉각을 측정하였고 전압과 주파수의 영향을 농도에 따라 비교하였다.

* 포항공과대학교 기계공학과, rhjdgml@postech.ac.kr

** 포항공과대학교 기계공학과, jmo0902@postech.ac.kr

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

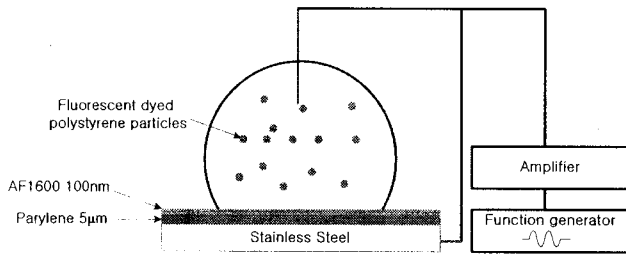


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

3. 결과

3.1 실험 정확도의 검증

직류 전기장 하의 전기습윤 현상은 이미 많은 연구가 이루어져 왔다. 전기습윤에 있어서 인가 전압과 접촉각의 관계를 나타내는 Lippmann-Young식은 열역학적 접근, 전기역학적 접근 등 몇 가지 다른 방법으로 아래와 같이 유도될 수 있다.

$$\cos\theta = \cos\theta_y + \frac{\epsilon_d \epsilon_0}{2d\gamma_n} V^2 = \cos\theta_y + \eta \quad (1)$$

위에서 무차원 전기습윤수 (η)는 표면 장력에 대한 전기력의 상대적 크기를 나타낸다. Young의 접촉각 (θ_y)은 전기가 가해지지 않은 상태에서의 접촉각이다. 탈이온화된 물의 표면 장력과 ($\gamma_n = 72.8$ mN/m) 패럴린의 유전률 ($\epsilon_d = 2.65$)을 위식에 대입하여 전압에 따른 접촉각의 변화를 예측할 수 있다.

Figure 2는 DC 전기장에 대하여 전기습윤 모델의 예측치와 실험치를 비교하고 있다. 낮은 전압에서는 예측값과 실험값이 매우 잘 일치하고 있지만, 140 V 이후엔 접촉각이 68 ~ 71 도로 거의 변하지 않고 있다. 이는 이미 잘 알려진 접촉각 포화 현상이다. 접촉각 포화 현상은 그 발생 기제가 아직 완전히 설명되지 못한 상태이다. 직류 전기장 하에서 전기습윤 실험 결과가 기존의 이론과 잘 일치하는 사실을 통하여 본 실험 방법 및 접촉각 분석 프로그램의 신뢰도를 간접적으로 검증할 수 있었다.

3.2 입자 부유물의 영향

Figure 3은 입자와 없는 경우와 800 nm 직경의 입자가 부유해 있는 경우에 대하여 입력 교류 전압을 143 V로 고정시키고

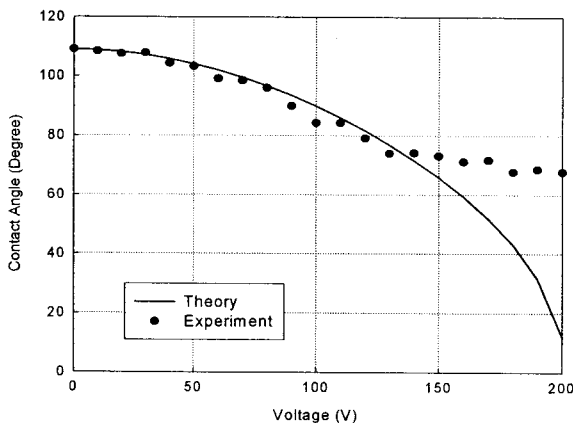


Fig. 2 Contact angle change for different DC voltages.

주파수를 변화시킬 때의 접촉각의 변화를 나타내고 있다. 입자의 농도는 0.01, 0.1, 0.5, 1wt%로 변화시켰다. Figure 3에서 볼 수 있듯이, 입자가 없는 액적의 경우 8 kHz 이전에는 주파수에 따른 접촉각의 변화가 없고, 그 이후부터는 접촉각이 주파수와 함께 증가하고 있다. 이러한 현상은 주파수의 증가에 따라서 액적이 전도체에서 절연체로 그 거동이 변했기 때문이다. 이와 같이 전도체에서 절연체로 그 거동이 변하는 주파수, 즉 전이 주파수(transition frequency)는 액체의 전도도에 비례하게 된다 [6].

입자 농도가 0.01wt%인 경우는 주파수에 따라 접촉각이 약간 변하지만, 입자가 없는 경우에 비해 그 변화량이 상당히 감소하였다. 입자의 농도가 0.1, 0.5, 1 wt %로 더욱 높아진 경우에는 실험이 수행된 전체 주파수 영역(1 kHz ~ 128 kHz)에 대하여 접촉각의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 현상은 액적의 전기 전도도가 (어떠한 원인에 의하여) 높아지게 되는 경우 전이 주파수의 증가를 초래하기 때문에 발생할 수 있다.

본 논문에서 수록하지는 않았으나 별도의 실험을 통하여 800 nm 직경의 입자 농도가 0.1wt %인 경우, AC 110 V ~ 140 V에서 접촉각 포화 현상을 관찰하였다. 아래 Fig. 3은 전압 143 V에서 수행되었으므로 입자 농도 0.1wt %인 경우에 대해서는 사실상 접촉각 포화가 일어난 상태라고 볼 수 있다. 입자 농도 0.1wt %에서 포화 접촉각 (약 80도)은 입자가 없는 경우의 포화접촉각(약 52도)과 비교하면 상당히 낮은 값을 갖는다.

3.3 계면활성제 영향의 배제

앞 절에서 수행된 실험은 입자에 계면활성제가 첨가된 경우이다. 일반적으로 계면활성제는 액적과 공기 사이의 표면장력을 감소시키고, 이에 따라 액적의 접촉각이 감소된다. 계면활성제의 영향을 배제시키고, 또한 입자가 가라앉는 문제를 어느 정도 방지하기 위해 saccharose가 첨가된 물을 사용하였다. Saccharose 수용액은 밀도를 1.13 g/cm³으로 조절 하였다. 실험에 사용된 800 nm 입자는 계면활성제가 포함된 용액에 suspension 상태로 존재하였다. 반면, 파우더 형태의 16 µm 직경의 폴리스티렌 입자는 계면활성제를 배제한 상태로 saccharose 수용액과의 혼합이 가능하였다.

Saccharose 수용액을 사용했을 경우는 입자가 전혀 없는 경우에 비하여 거의 모든 점에서 차이를 발견할 수 없었다. 이

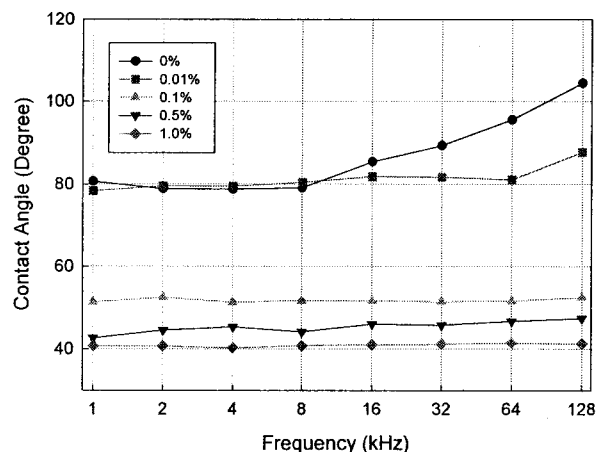


Fig. 3 Frequency dependence of contact angle for various particle concentrations at 143V (diameter of particle = 800 nm).

때 입자의 농도는 1wt %였다. 즉, 초기 전압이 가해지기 전의 접촉각이 같았고, 전압 및 주파수의 변화에 대한 접촉각의 변화도 거의 같은 것으로 나타났다. 이런 현상이 발생된 원인으로는 여러 가지가 있을 수 있을 것이다. 우선, 800 nm 입자가 포함된 액적과 달리 16 μm 입자가 포함된 액적은 계면활성제가 첨가되지 않았다. 이 부분만을 살펴보면 800 nm 입자가 포함된 액적에 대해 나타난 현상은 계면활성제에 의한 영향이라고 생각할 수 있다. 하지만, 각각의 실험에서 사용한 입자의 크기가 달랐고, 800 nm 입자와 달리 16 μm 입자에서는 입자가 바닥에 가라앉는 것을 방지하기 위해 saccharose 수용액을 사용하였다. 이와 같은 실험 조건 때문에 입자가 포함된 액적의 접촉각 변화가 단지 계면활성제만의 영향이라고 단정지를 수 없다.

또한 입자의 크기가 800 nm에서 16 μm로 증가함으로 인해 용액속에 같은 질량의 입자가 존재하는 경우 16 μm 입자들의 총 표면적이 1/20로 감소하게 된다. 따라서 전기 이중층 (electrical double layer)과 같이 입자의 표면적과 관련된 현상의 (예, 표면 전류) 영향이 16 μm와 800 nm에서 서로 차이가 날 수가 있다.

16 μm 입자는 800 nm 입자보다 크기가 20배 크기 때문에, 입자가 액적의 끝단에 모이기 어렵게 된다. Kang [3]의 전기습윤의 원리에 의하면 액적의 끝단에서 전기장에 의해 액적의 접촉각이 변하게 된다. 만약, 입자가 액적의 끝단에 응집되거나 한다면 전기장이나 액적에 가해지는 전기력이 상당히 변할 수 있을 것으로 유추된다. 그러나 16 μm 입자의 실험에서는 입자가 없는 경우와 여러 면에서 별 차이가 없는 것으로 나타났으므로 그러한 현상은 발생하지 않았던 것으로 판단된다.

4. 전기 습윤의 특이 현상

앞서의 입자의 영향을 규명하기 위해 실험을 수행하는 동안 별도의 여러 흥미로운 현상들이 관찰되었다. 이 장에서는 그러한 결과들에 대하여 보고하고자 한다.

4.1 액적 생성

먼저 AC 전기습윤의 경우에 있어 큰 액적 주위로 수십 마이크로 크기의 작은 액적들이 생성이 되는 것을 관찰할 수 있다 (Fig. 5). Figure 5는 탈이온화 된 물에 대해 액적이 생성되는 모습을 보여주고 있는데 그 외에 saccharose 13wt% 수용액, 800 nm 직경의 폴리스티렌 입자를 10wt% 포함하고 있는 용액에 대하여 주파수와 전압을 변화시키면서 액적 생성 유무를 관찰하여 보았다.

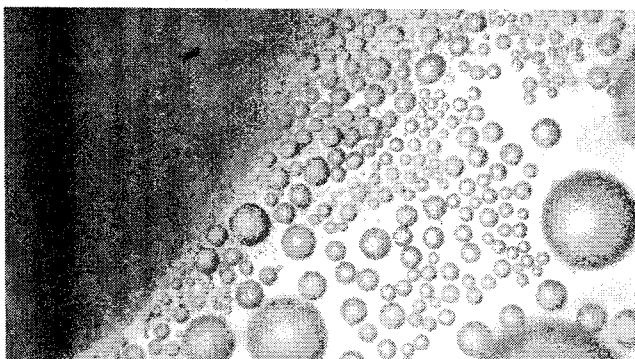


Fig. 5 Droplet generation for DI water ($V_{rms} = 143$ V, 128 kHz)

탈이온화 된 물의 경우 전압 140 V에서는 주파수 16 kHz 부근에서 액적이 생성이 되지만, 보나 낮은 전압 100 V에서는 상당히 높아진 주파수인 64 kHz 부근에서 액적이 생성이 되었다. 전압이 보다 낮은 60 V에서는 256 kHz까지 액적이 발생되지 않았다. 결과적으로 전압이 높은 경우에는 상대적으로 낮은 주파수에서 액적이 생성되었고, 주파수가 높은 경우에는 상대적으로 낮은 전압에서도 액적이 생성이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 주파수에 대한 액적 생성의 경향이 800 nm 직경의 입자를 포함한 액체에 대해서도 거의 유사하게 나타났다.

NaCl 수용액에서는 전압이 140 V인 경우 농도가 10^{-3} M에 대해서는 32 kHz 부근에서 액적이 생성되었으나, 1 M 농도에서는 주파수 256 kHz 까지도 액적이 생성되지 않았다. 이것은 액적 생성이 액적의 전기 전도도와 관련이 있음을 의미한다. 염의 농도가 증가함에 따라 액적 생성이 잘 일어나지 않는 현상은 기존의 실험에서도 관측되었다[7].

아울러 DC 전기장에 대해서는 전압을 접촉각 포화 전압(약 140 V)보다도 높은 200 V까지 증가시켜 보았지만 액적은 발생되지 않았다. 액적이 생성되는 원인은 아직 밝혀지지 않았으며, 그 원인을 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요하다.

4.2 유사 쌍안정성(pseudo-bistability)

Figure 6은 탈이온화 된 물에 대하여 DC 전압 140 V를 가한 후 액적의 접촉각이 감소한 상태에서 전압을 유지하고 액적과 연결된 전극을 액적으로부터 제거했을 때 발생하는 현상을 보여주고 있다. Figure 6(a)는 (시간에 대하여 순차적으로) 전압을 가하지 않았을 때, (b)는 전압을 가했을 때, (c)는 전극을 분리시켰을 때, (d)는 전극을 분리시킨 상태에서 20분이 지났을 때를 나타낸다. Figure 6(d)에서 액적이 작은 이유는 시간이 지남에 따라 탈이온화 된 물이 증발했기 때문이다. Figure 6(c)에서 볼 수 있듯이 접촉각이 감소하지 않고 그대로 유지되는 있다. 이런 상태로 약 20 분간 방치하였으나 Fig. 6(d)와 같이 접촉각이 거의 변하지 않고 유지됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 전기습윤이 유사 쌍안정성(pseudo-bistability)이 있음을 나타낸다. 엄밀한

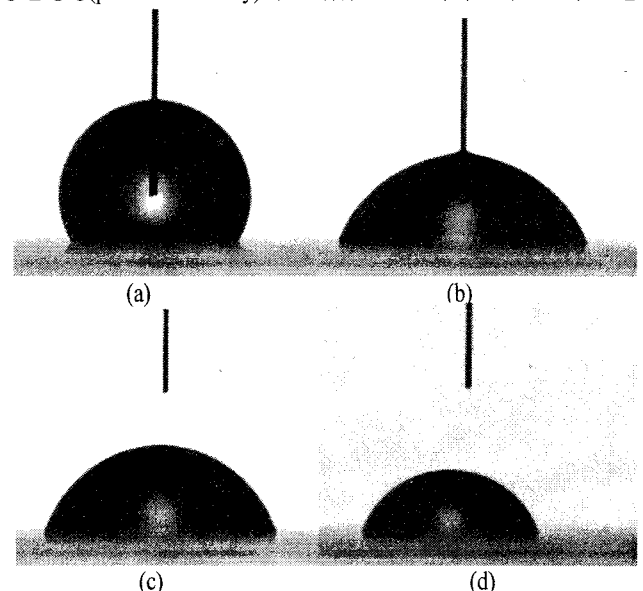


Fig. 6 Pseudo-bistability of electrowetting ($V_{DC} = 140$ V)

의미에서 쌍안정성이란 서로 다른 두 가지 입력 조건에 대하여 같은 평형 상태를 갖는 것을 의미한다. 전기 습윤에는 그간 쌍안정성이 없는 것으로 알려져 왔었으며 본 연구를 통하여 새롭게 발견될 사실이다 [8].

4.3 액적 내부의 유동

Figure 7은 saccharose 13wt% 수용액에 직경 16 μm 의 폴리스티렌 입자가 1wt% 부유하고 있을 경우에 대하여 전압이 140 V이고 주파수가 각각 1 kHz (왼쪽)와 100 kHz (오른쪽) 인 경우의 액적 내부의 영상이다. 액적 내부의 검은 부분은 입자들을 나타내고 흰 부분은 액체에 해당한다. 이 경우 액적 주변에는 실리콘 오일 (점도 = 10 cPs, 밀도 = 0.87 ~ 0.98)이 존재하고 있다. 공기중의 액적에 대해서는 굴절률 차이로 인해서 내부를 관찰하기가 곤란하다. 주파수가 1 kHz일 때는 입자가 액적 내부 하단에서 움직이는 것처럼 보이고, 100 kHz에서는 입자가 전극 주위에서 서로 체인을 형성하면서 회전을 하고 있음을 관찰할 수 있었다. 100 kHz에서 입자가 연결이 되는 모양은 유전영동 (dielectrophoresis)에서 전형적으로 발생하는 것과 매우 비슷한 것임을 알 수 있었다.

Figure 8은 액적에 각각 DC와 매우 높은 주파수의 AC 전압을 가했을 때, 액적 내외부의 전기 포텐셜(potential) 분포를 수치해석적으로 구한 결과이다. 수치해석은 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics™이다. 그림을 통하여 DC 경우는 액적 내부에 전기장이 존재하지 않으나 Fig. 8(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 AC 전기장의 경우는 액적 속의 전극 주위로 포텐셜 구배가 강하게 형성이 되는 것을 알 수 있다. 이 전기장에 의해 전극 주위에서 유전영동이 발생할 것이라는 것을 예상할 수 있다.

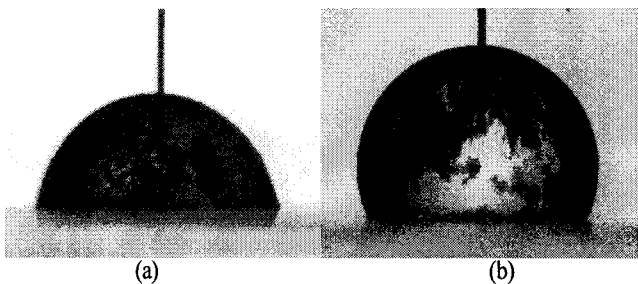


Fig. 7 Motion of particles for different AC frequency at $V_{rms} = 140V$: (a) 1 kHz; (b) 100 kHz.

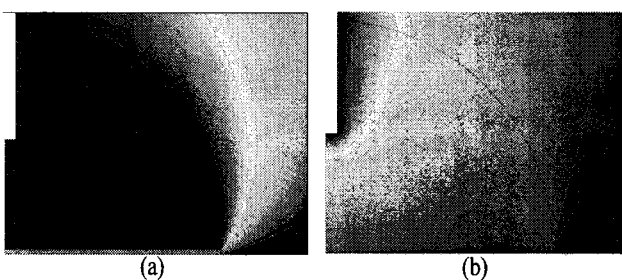


Fig. 8 Numerical simulation: (a) DC voltage; (b) AC voltage.

주파수 1 kHz와 100 kHz 사이의 주파수인 7 kHz ~ 9 kHz에서는 입자의 운동이 관찰되지 않았다.

5. 결론

- 1) 계면활성제가 첨가된 현탁액의 입자의 농도가 높아질수록 전도체에서 절연체로의 전이가 지연되는 것이 관찰되었다. 이것은 입자 현탁액의 전기 전도도 증가가 한 원인이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 800 nm 직경의 현탁액의 경우 입자가 없을 때보다 포화 접촉각이 낮아졌다.
- 3) 계면활성제를 첨가되지 않고 saccharose 수용액에 16 μm 직경의 입자가 포함된 액적에 대해서는 입자에 의한 영향을 발견할 수 없었다. 전기 습윤에 대한 입자의 영향 측면에서 800 nm 직경의 현탁액과 차이가 나타나는 점에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.
- 4) 교류 전압에 대해서는 고주파수에서 삼상접점 (three-phase contact line) 부근에서 작은 액적이 생성되었다. 직류 전압의 경우는 액적이 생성되지 않았다.
- 5) 전기 습윤에 있어서 유사 쌍안정성이 존재할 수 있음을 실험적으로 입증하였다.
- 6) 액적 내부에 비교적 빠른 유속의 유동이 존재함과 유전영동 형태의 입자의 체인 형성 현상이 나타남을 관찰하였다. 이러한 현상 역시 주파수에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] Mugele, F. and Baret, J.-C., 2005, "Electrowetting: from basics to applications," *J. Phys.: Condes. Matter*, Vol. 17, pp. R705~R774.
- [2] Mugele, F., Klingner, A., Buehrle, J., Steinhauser, D. and Herminghaus, S., 2005, "Electrowetting: a convenient way to switchable wettability patterns," *J. Phys.: Condes. Matter*, Vol. 17, pp. S559~S576.
- [3] Kang, K. H., 2002, "How electrostatic fields change contact angle in electrowetting," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 10318~10322.
- [4] Pollack, M. G., Shendorov, A. D. and Fair, R. B., 2002, "Electrowetting-based actuation of droplets for integrated microfluidics," *Lab on a Chip*, Vol. 2, No. 1, pp. 96~101.
- [5] Srinivasan, V., Pamula, V. K., Pollack, M. G. and Fair, R. B., 2003, "Clinical diagnostics on human whole blood, plasma, serum, urine, saliva, sweat, and tears on a digital microfluidic platform," *TAS* 2003.
- [6] 홍진석, 고성희, 강관형, 강인석, 2006, 경주, "교류 전압 하에서의 액적의 전기습윤 현상," 유체공학회 논문집.
- [7] Vallet, M., Vallade, M., and Bergea, B., 1999, "Limiting phenomena for the spreading of water on polymer films by electrowetting," *Eur. Phys. J. B* 11, pp 583-591.
- [8] Feenstra, B. J., Hayes, R. A., Camps, I. G. J., Hage, L. M., Johnson, M. T., Roques-Carmes, T., Schlangen, L. J. M., Franklin, A. R., Valdes, A. F., and Ford, R. A., 2004, "A video-speed reflective display based on electrowetting: principle and properties," *J. Soc. Inf. Display* 12, pp. 293-299.