

## 마이크로 유체 토출을 위한 전기 습윤 현상 기반의 Actuator

김한상\*, 성탄일\*, 최홍순\*\*, 박일한\*  
 성균관대학교\*, 경북대학교\*\*

### An electrowetting-based actuator for dispensing micro fluids

Han-Sang Kim\*, Tan-il Sung\*, Hong-soon Choi\*\*, Il-Han Park\*  
 Sungkyunkwan University\*, Kyungpook National University\*\*

**Abstract** - 마이크로 스케일의 유체를 dispensing 하기 위한 방법으로 electrowetting 현상을 이용한다. 작은 물방울은 높은 표면에너지에 의해 좁은 관 내부에서 떨어지지 않고 정적인 평형상태를 이루게 된다. 이 때, 유체 내부에 가느다란 전극을 삽입하고, 외부에 금속 평판을 설치한 후 두 전극 사이에 일정한 전압을 인가할 경우 sharp edge의 형태를 지니는 전극의 끝단에서 매우 높은 전계의 변화가 발생한다. 이 때, 작은 물방울의 electrowetting 현상에 의한 내부의 압력 변화를 수치 해석적으로 예측하고 이로 인한 형상의 변화 및 물방울의 dispensing 현상을 실험적으로 관찰한다.

#### 1. 서 론

일반적으로 Electrowetting 이란 절연처리 된 전극 사이의 액체에 전계를 인가하면 액적의 접촉각이 변하는 현상을 일컫는다. 이러한 electrowetting 현상에 관한 기존의 연구들의 경우, 인가된 전압에 따른 접촉각의 변화되는 정도에 관하여 실험적으로 접근하거나[1], 일정 전압 이상 인가되었을 때 접촉각이 더 이상 감소하지 않는 saturation 현상과 누설 전류의 상관관계에 관하여 연구하고[2], 또한 Lap-on-a-chip 으로써의 가능성을 검증하기 위해 평면상에서 수 나노 리터 수준의 작은 액적을 큰 액적에서 분리하여 이동시키는 것에 관하여 많은 연구들이 이루어져 왔다[3].

서로 다른 물리현상이 결합되어 영향을 주고받는 electrowetting 현상의 접근 방법은 주로 contact angle의 변화와 같은 기계적인 관점에서 해석되고 실험을 진행해왔다. 하지만, 인가된 전계에 의해 액적의 형상이 변한다는 관점에서 electrowetting 현상을 전기적인 관점으로도 접근할 수 있다[4].

본 논문에서는 Kelvin Force Density 를 기반으로 전자기력에 의한 유체의 형상 변화를 예측하고[4], 이를 마이크로 수준의 매우 작은 액적을 수직으로 높은 실재의 pipette와 같은 형태로 토출하기 위한 방법으로 electrowetting 현상을 활용한 모델을 제시한다.

#### 2. 이론 및 해석 모델

##### 2.1 정전계 내의 유전체에 작용하는 힘

유전체 속에서는 모든 전자가 특정 원자 또는 분자에 붙어있다. 다시 말하면, 전자들은 분자 속에서는 움직일 수 있으나 분자로부터 떨어져 나갈 수는 없다. 유전체 속의 전자의 이러한 작은 효과들이 모여 유전체 재료의 특성으로 나타난다. 유전체 원자나 분자의 전하분포가 전계에 의해 변형되는 두 가지 주된 현상은 분극과 회전이다.

전기적으로 중성인 원자를 전계 속에 두었을 때, 원자 전체는 전기적으로 중성이지만, 그 중심의 원자핵은 양전하를 띠고 그 둘레를 음전하를 띤 전자구름이 감싸고 있다. 이 두 부분은 전계에 의한 힘을 각각 반대로 받게되어 양전하와 음전하의 중심이 조금 어긋나게 되는데 이러한 현상을 분극이라 한다. 이 때의 이 원자는 아주 작은 쌍극자 모멘트  $p$  를 갖게되고 이 쌍극자 모멘트는 전계에 비례한다.

중성원자에는 쌍극자 모멘트  $p$  가 없다가 전계를 인가하여 생겼지만, 물과 같은 물질은 외부 전계를 인가하지 않아도 전기 쌍극자가 나타난다. 이러한 분자를 극성 분자(polar molecule)라 한다. 만약 극성 분자를 전계 안에 놓으면 전계 방향으로 쌍극자가 회전력을 받게 된다.

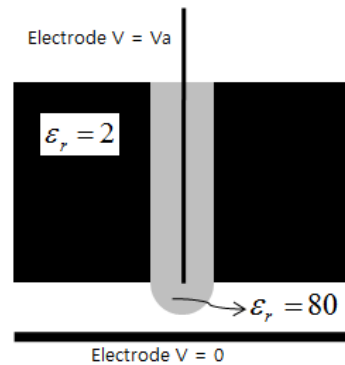
인가된 전계가 균등하지 않을 때, 쌍극자는 회전력과 더불어 알짜 힘도 받는다. 이 때에 유전체 내부의 쌍극자가 받는 힘을 가상공극을 적용한 외부전계를 도입하여 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다[6].

$$f_c = (p \cdot \nabla) E \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) = - (p \cdot \nabla) \nabla V \left( \frac{\epsilon_r + 1}{2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $E$ 는 인가된 전계이고,  $V$ 는 인가된 전압이다.

##### 2.2 해석 모델

위의 해석 이론을 바탕으로 수치해석적인 모델의 개념도를 다음과 같이 나타내었다.

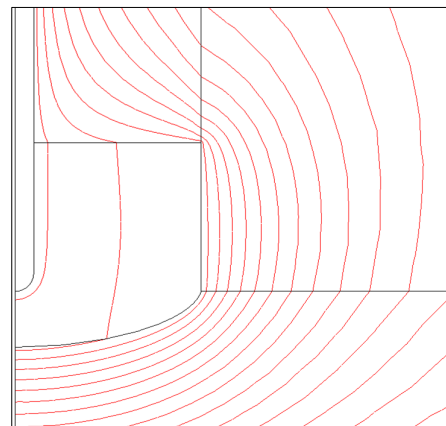


<그림 1> 해석 모델의 개념도

이 때 유체는 유전율이 80인 일반적인 water를 기준으로 하였으며, 평판의 electrode는 두께가 1mm인 구리판이고, 가는 선으로 모델링 된 전극의 경우 지름이 0.5mm이며, 전극의 위치는 유전율이 2인 pipette 끝단의 위치와 일치한다. 이 때 물방울의 크기는 pipette의 지름크기에 따라 달라지므로, 그 크기를 고정시킨 상태에서 전압의 크기와 전극의 위치에 변화를 주어가면서 그에 따른 액적에 작용하는 힘을 비교하여 검증하고자 한다.

##### 2.3 인가 전압 및 전극의 위치에 따른 유체에 작용하는 힘

관의 직경은 5mm로 고정하고, 그림2와 같은 형태의 액적에 1000V 부터 9000V까지 총 5단계로 나누어 인가하고, 전극의 양 끝단을 기준으로 3mm부터 11mm까지 2mm 간격으로 변화시켜가면서 각각의 경우에 액적에 작용하는 힘을 계산하여 표1에 나타내었고 단위는 [N]이다.



<그림 2> 전압 인가에 의한 액적 내부의 등전위선 분포

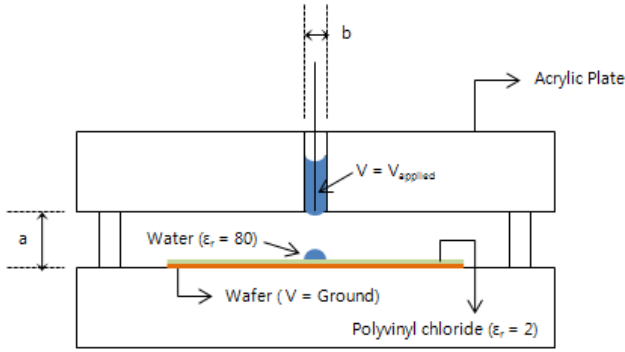
수치해석 결과와 실험결과와의 비교가 가능하도록 축대칭으로 모델링하고 수치해석 한다.

〈표 1〉 전압 및 전극 위치의 따른 액적에 작용하는 y축 방향 힘

전압[V]	전극 간격 [mm]				
	3	5	7	9	11
1000	-1.54e-5	-4.42e-6	-1.71e-6	-7.65e-7	-2.99e-7
3000	-1.39e-4	-3.97e-5	-1.54e-5	-6.89e-6	-2.70e-6
5000	-3.86e-4	-1.10e-4	-4.27e-5	-1.91e-5	-7.50e-6
7000	-7.56e-4	-2.16e-4	-8.36e-5	-3.75e-5	-1.47e-5
9000	-1.25e-3	-3.58e-4	-1.38e-4	-6.18e-5	-2.43e-5

3. 실험 및 결과

3.1 실험 모델



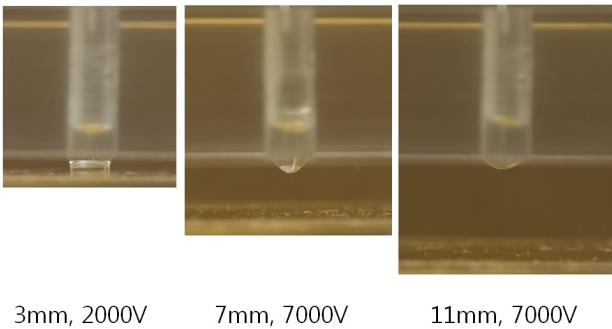
〈그림 3〉 실험 모델

전극과 평판 사이의 거리(a)를 3mm, 7mm, 11mm 간격으로 나누어서 비교 실험 하였고, 토출구 직경(b)은 5mm로 고정하였다. 실험 스테이지를 옮기거나 실험 테이블에 약간의 충격이 가해지더라도 형상의 변화가 액적의 양을 반복실험을 통해 40μl 로 고정하고, 5번의 반복실험마다 새로운 액적으로 주입하였다.

3.2 실험 결과

그림 4는 전극과 평판 사이의 거리에 따른 유체의 형상을 나타낸다. 전극의 간격이 각각 7mm, 11mm 일 때 7000V의 전압을 인가했을 때의 형상이고 간격이 3mm 일 때 2000V를 인가했을 때의 형상을 나타낸다. 전극 사이의 거리가 3mm 일 때는 전압을 2000V 인가했을 때 전극사이 가 액적으로 연결되었다.

각각 3mm 에서는 약 1900V에서 2000V 사이, 7mm 에서는 약 6000V에서 7000V 사이, 11mm 에서는 12KV에서 13KV 사이에서 미세한 액적이 분리가 이루어지는 것을 육안으로 확인 할 수 있었다. 이 세 가지 경우를 수치해석하면 인가된 전계에 의해 액적에 작용한 힘은 3mm 2000V 일 때 -6.17e-5[N], 7mm 6000V 일 때 -6.14e-5, 11mm 13000V 일 때 -5.08e-5[N]이다.

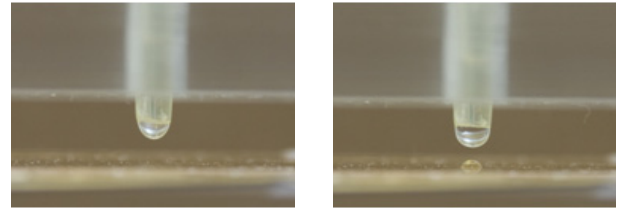


〈그림 4〉 전극의 간격에 따른 액적의 형상 변화

앞의 실험에서 사용하였던 실험 모델에서는 매우 작은 미세방울로 분배가 되는 것을 육안으로는 확인할 수 있었지만, 궤적을 확인하기 힘들었다. 또한, 액적의 분배가 확실하게 이루어 지기 이전에 break down이 발생하기도 하고, 실험환경의 습도 때문에 매우 짧은시간에 건조되어 액적이 깔끔하게 분배되는 것을 사진 촬영 등의 기록으로 남기는 것이 매우 어려웠다.

액적을 담고있는 튜의 폭이 줄어들수록 액적에 가해지는 힘이 증가

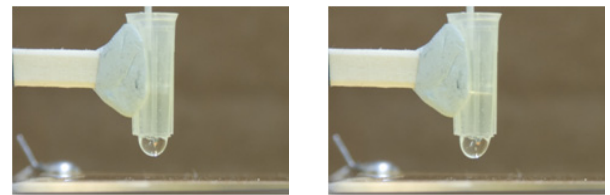
하는 것을 수치해석을 통해 확인하고, 토출구 끝단을 돌출시켜 실험하였다. 전극의 간격이 7mm 일 때 6000V의 전압을 인가하여 액적의 분배가 이루어진 후의 모습을 그림5에 나타내었다.



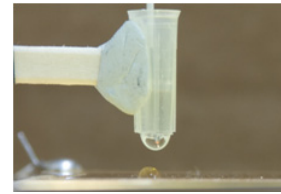
(a) 전압 인가 전 (b) 6000V 전압 인가 후

〈그림 5〉 전압 인가전과 인가 후 액적의 분배

초기 실험모델에서 튜의 폭을 최대로 줄여서 더 낮은 전압에서도 분배가 이루어지는지를 확인하였다. 실험 조건이 조금 달라졌지만, 약 1000V 더 낮은 전압에서 액적의 분배가 이루어진 것을 그림6에 나타내었다.



(a) 전압 인가 전 (b) 4000V 인가 후



(c) 5000V 인가 후

〈그림 6〉 전압 인가전과 인가 후 액적의 분배

3. 결 론

본 논문에서는 마이크로 스케일의 유체를 dispensing 하기 위해 electrowetting 현상을 이용하는 방법을 제안하고, 수치해석 및 실험을 통해 가능성을 보였다. 액적을 dispensing하기 위해 전극의 간격과 액적을 담고 있는 노즐부의 형상이 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Frieder Mugele and Jean-Christophe Baret, "Electrowetting: From basics to applications", *Journal of Physics: CONDENSED MATTER*, 17, R705-R774, 2005  
 [2] A.G.Papathanasiou, A.T.Papaioannou, and A.G.Boudouvis, "Illuminating the connection between contact angle saturation and dielectric breakdown in electrowetting through leakage current measurements", *Journal of Applied Physics*, 103, 034901, 2008  
 [3] T.B. Jones, "Liquid dielectrophoresis on the microscale", *Journal of Electrostatics*, 51-52, 290-299, 2001  
 [4] Tan Il Sung, "Modeling and Analyzing of Electrowetting Using Electromagnetic Body Force Density and Surface Tension", *IEEE Trans. on Magnetics*, 47, 946-949, 2010  
 [5] Se-Hee Lee, Hong Soon Choi, and Il Han Park, "Introducing the Virtual Air gap Scheme to the Kelvin Force Density with External and Total Field", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.43, No.4, pp.1457-1460, April 2007  
 [6] Valerian A Nemchinsky, "Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode", *Applied Physics*, 27, 1433-1442, 1994