

## 전극의 전압과 위치변화가 액적의 Electrowetting에 미치는 영향

성탄일\*, 조영한\*, 김영선\*, 최홍순\*\*, 박일한\*  
 성균관대학교\*, 경북대학교\*\*

### Effect for Electrowetting of Droplet according to Applied Voltage and Height of Electrode

Tan-Il Sung\*, Young-Han Cho\*, Young-Sun Kim\*, Hong-Soon Choi\*\*, Il-Han Park\*  
 Sungkyunkwan University\*, Kyungpook National University\*\*

**Abstract** - 유체의 전자기력에 의한 거동특성 파악을 위해 전자기 체적력에 의한 접근법을 이용하였다. 수정된 Kelvin force를 유체정역학 방정식에 도입하고 유체표면에서의 압력이 일정해야 한다는 원리를 이용하여 유체 표면의 형상을 얻어낸다. 액적에 인가하는 전압의 크기와 전극을 쫓는 높이의 변화에 따른 액적의 Electrowetting 영향을 수치해석한다.

#### 1. 서 론

Electrowetting이란 절연체로 코팅된 도체판 위의 액적에 전극을 쫓아 전압을 인가하면 액적의 형상이 변화하는 현상이다. 기존의 연구들은 액적에 인가된 전압이 액적과 코팅된 도체 판이 이루는 접촉각에 변화를 일으키고 각도의 변화로 인해 표면의 형상이 변한다는 관점이 주를 이루고 있다. 하지만 액적과 도체 판의 접촉각은 전압이 인가되지 않았을 때에도 중력에 의한 영향이 반영되어있다. 다시 말해서 전압에 의해 액적의 접촉각이 변하고, 변화된 접촉각에 의해 액적의 형상이 변한다는 관점보다는 전압에 의해 액적에 힘이 인가되고 그 힘에 의해 액적의 표면이 힘의 평형을 이루도록 액적의 형상이 변한다고 보는 것이 더 타당할 것이다.

Electrowetting은 고속 코팅, 미세입자 분배기 및 유체 렌즈 등에 이용될 뿐만 아니라 micro actuator나 lab on chip 같은 electrophoresis 분야에서도 wetting 효과를 이용하여 시스템의 구동력으로 사용하기도 한다. 그러므로 구동력의 제어나 유체 유동의 시스템을 구현하기 위해서는 electrowetting에 구체적으로 미치는 요인에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 전자기 체적력에 의해 액적의 형상변화를 알아내는 알고리즘을 제시하고, 액적의 형상변화에 미치는 영향을 분석하였다. 우선 전극에 인가한 전압의 세기를 변화하여 전계가 클 경우의 wetting 효과를 알아보고, 둘째로는 전극의 높이에 따라 액적형상의 변화를 살펴보고 있다.

#### 2. 해석 이론

##### 2.1 전장에서의 체적력 계산

물 분자와 같은 극성 분자는 전계  $\mathbf{E}$  내에서 식(1)과 같은 회전력을 받는다.

$$\mathbf{N} = \mathbf{p} \times \mathbf{E} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{p}$  는 1개의 쌍극자 모멘트,  $\mathbf{N}$  은 쌍극자가 받는 회전력이다. 여기서 인가된 전계가 고르지 못하면 쌍극자의 양 끝에 분포하는 각각 다른 부호의 전하가 받는 힘 또한 균일하지 않다. 이때 그림 1에서와 같이 쌍극자가 받는 힘은 식(2)와 같다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_+ + \mathbf{F}_- = q(\mathbf{E}_+ - \mathbf{E}_-) = q(d\mathbf{E}) \quad (2)$$

여기서  $d\mathbf{E}$  는 양전하와 음전하가 있는 끝에서의 전계의 차이를 나타낸다. 쌍극자의 길이가 아주 짧으면  $d\mathbf{E}$  의 미소 변화를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\mathbf{E} = (\mathbf{s} \cdot \nabla)\mathbf{E} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{s}$  는 쌍극자의 길이이다. 따라서

$$\mathbf{F} = (\mathbf{p} \cdot \nabla)\mathbf{E} \quad (4)$$

이다. 가상공극을 적용한 외부전계(external field)를 이용하여 Kelvin식을 나타내면 다음과 같다[3,4].

$$\mathbf{f}_e = (\mathbf{p} \cdot \nabla)\mathbf{E}_0 = -(\mathbf{p} \cdot \nabla)\nabla V \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{f}_e$  는 Kelvin Force Density,  $\mathbf{E}_0$  는 인가한 외부전계,  $V$  는 인가한 전압,  $\epsilon_r$  은 유전체의 비유전율을 나타낸다.

##### 2.2 힘의 평형방정식

일반적으로 유체에 관해 적용되는 지배방정식은 Navier-Stoke 방정식이다. 본 논문에서 적용하는 모델은 유체정역학만을 고려하고, 유체의 운동 및 점성은 고려하지 않았으며, Kelvin Force Density 을 체적력으로 추가하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_e = \mathbf{f}_b \quad (6)$$

여기서  $p$  는 압력,  $\rho$  는 질량밀도,  $\mathbf{g}$  는 중력가속도,  $\mathbf{f}_e$  는 전자기체적력밀도이다. 유체의 자유표면  $S_f$  위치에서의 압력을  $p_i$  라 하자.  $p_i$  는 기준점으로 정한 표면  $S_0$  점에서부터 유체의 내부의 적분경로를 따라 적분된 값과 표면장력에 의한 압력과 대기압이 더해진 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$p_i = \int_{S_0}^{S_f} \mathbf{f}_b \cdot d\mathbf{l} + p_0 + p_{st} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (7)$$

여기서  $p_0$  는 대기 압력이고,  $p_{st}$  는 유체의 곡률에 의한 압력이다. 유체정역학적 평형 방정식에 액적의 표면에서의 표면장력을 고려하는 방법은 다음과 같다.

액적의 표면은 표면장력에 의해 수축하여 내부 압력을 증가시키는 경향이 있어서 액적이 더 이상 커지지 않으면 과압력  $\Delta p$ (내부와 외부의 압력차이)와 표면장력에 의한 힘들이 평형 상태가 된다. 반경이  $r$  인 구형 액적의 반쪽 모델을 예로 들어보면, 압력에 의한 위 방향의 힘은  $\pi r^2 \Delta p$ 이다. 액적은 정적 평형 상태에 있다고 가정하였기 때문에 이 힘은 반구의 끝에 작용하는 표면장력  $2\pi r \sigma$  와 평형을 이루어야 한다. 따라서 액적에 대하여

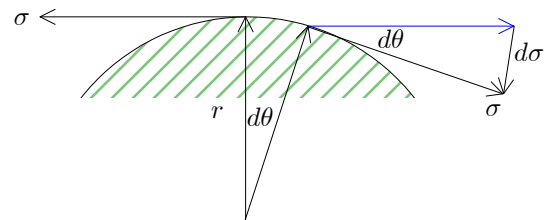
$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r \sigma \quad (8)$$

즉,

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r} \quad (9)$$

이 되어야 한다. 여기서  $\sigma$  는 물의 표면장력(20°C에서 0.0728[N/m])이다. 표면 장력 또한 다음과 같이 고려가 되므로 그림 1 에서와 같이 압력으로 환산할 수 있다. 본 논문에서는 2차원 해석을 하였으므로 표면장력에 의한 압력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{st} = \frac{d\sigma}{length} = \frac{\sigma d\theta}{rd\theta} = \frac{\sigma}{r} \quad (10)$$

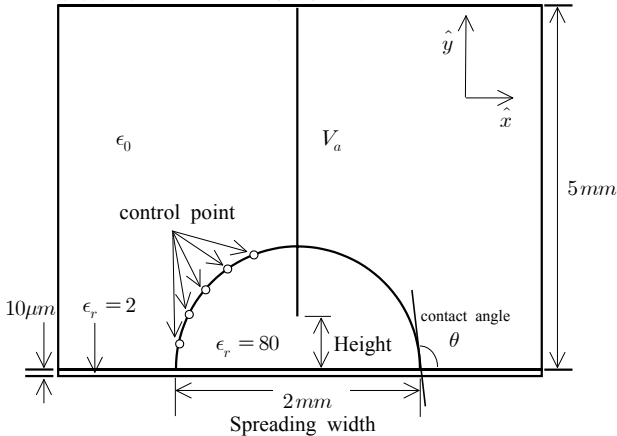


<그림 1> 표면 장력에 의한 압력

### 3. 전극의 전압 및 길이 변화

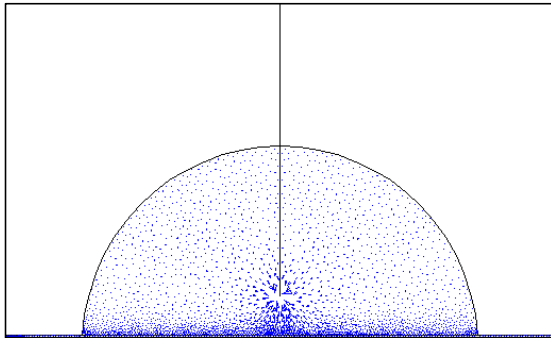
#### 3.1 해석모델

수치해석에 적용된 모델은 그림2와 같다.



〈그림 2〉 해석 모델

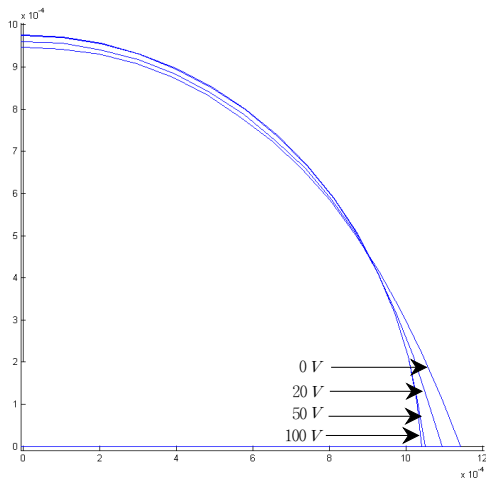
액적의 반경은  $0.01m$  이고, 도체판 위의 코팅의 두께는  $10\mu m$ 이다. 보편적인 경우의 코팅의 두께는  $1\mu m$  이내이지만 액적과의 스케일 차이로 인한 요소분할 문제로 인해 코팅의 두께를 두껍게 가정하였다. 수정된 Kelvin 식을 이용하여 액적내부의 체적력 밀도의 분포는 그림3과 같다.



〈그림 3〉 전자기력 밀도의 분포

#### 3.2 전압에 따른 변화

전극을 바닥에서부터  $0.2mm$  높이로 꽃았을 때 전압을  $0V, 20V, 50V, 100V$  인가하였다. 각각의 액적의 형상변화는 그림4에 나타내었다,



〈그림 4〉 전압에 따른 액적 형상의 변화

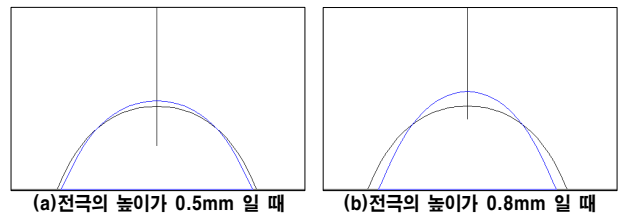
표1에는 전극의 높이가  $0.2mm$  일 때 인가 전압의 크기에 따른 액적 형상의 변화를 나타내었다. 도체판과 액적의 접선이 이루는 각을 Contact angle에 나타내었고,  $2mm$  인 직경과 비교한 액적의 퍼진 길이를 Spreading width에 나타내었다. Contact angle 은 액적과 도체 판이 닿은 지점의 접선의 방정식을 이용하여 구하였다. 인가전압이  $0V$  일 때 Spreading width 가  $0mm$ , Contact angle 이  $90^\circ$  가 아닌 것은 초기 값(직경: $2mm$ , Contact angle: $90^\circ$ )인 상태에서에서 중력의 영향이 고려되었기 때문이다.

〈표 1〉 전압의 크기에 따른 액적 형상의 변화

Applied voltage[ V ]	Spreading width[mm]	Contact angle[°]
0	2.082	95.2
20	2.115	99.5
50	2.163	105.2
100	2.286	113.3

#### 3.3 전극의 높이에 따른 변화

그림5의 (a)와 (b)는 전극의 높이가 각각  $0.5mm, 0.8mm$  일 때의 형상과 전극의 높이가  $0.2mm$ 일 때의 형상을 비교하여 나타내었다. 전극의 높이에 따라 액적이 전극을 따라 올라가는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 전극의 높이에 따른 spreading width와 contact angle을 나타내었다. 이 결과로부터 전극의 높이는 wetting 현상의 크기와 방향에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.



〈그림 5〉 전극의 높이에 따른 액적의 형상 변화

〈표 2〉 전극의 높이에 따른 액적 형상의 변화

Height [ mm ]	Spreading width[mm]	Contact angle[°]
0.2	2.082	113.3
0.5	1.979	112.1
0.8	1.835	110.8

### 4. 결 론

본 논문에서는 액적의 시스템의 요인들이 형상변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전자기체적력에 의한 유체 형상변화 해석방법을 제시하였다. 그리고 전극의 전압세기와 전극의 위치 변화에 따른 wetting 효과를 분석하였다. 전극에 큰 전압이 인가될수록 액적의 spreading width가 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 전극의 높이에 따라서는 spreading width가 증가 또는 감소하기도 하였다. 즉 전극의 위치는 액적시스템의 전계분포를 결정하는 중요 요소로 wetting 효과의 증가, 감소뿐만 아니라 방향을 바꿀 수 있는 요소이다.

#### [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] R. Digilov, "Charge-Induced Modification of Contact Angle: The Secondary Electrocapillary Effect", Langmuir, 16, 6719-6723, 2000  
 [3] H. S. Choi, I. H. Park, and S. H. Lee, "Force calculation of magnetized bodies in contact using Kelvin's formula and virtual air-gap," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 16, no. 2, pp. 1832-1835, June 2006.  
 [4] 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