

전자기장 분포에 의한 액적 표면의 형상 변화에 관한 연구

성탄일, 최윤식, 김영선, 최홍순*, 박일한
성균관대학교, 상주대학교*

A Shape Deformation of Droplet Surface by Electrostatic Field

Tan-il Sung, Yoon-Seok Choi, Young-Sun Kim, Hong-Soon Choi, Il-Han Park
Sungkyunkwan University, Sangju National University*

Abstract - Electrowetting 현상을 contact angle의 변화가 아닌 전자기 체적력의 관점으로 고찰한다. 정수역학의 방정식과 Kelvin 식, 표면장력 공식을 도입하고, 유체표면의 모든 곳에서의 압력을 일정하다는 원리를 이용하여 유체 표면의 형상을 고찰한다. 액적의 초기 형상을 반원, 반지름은 1mm 이다. 절연 처리한 판형태의 도체 위에 액적을 올려놓고 그 액적에 편을 끊은 형태로 전개를 인가한다.

1. 서 론

절연체로 코팅된 전극 상의 액적에 외부전압을 가하면 액적의 접촉각이 변화되는 현상을 electrowetting 이라고 한다. 기존의 연구들은 이 electrowetting 현상을 해석할 때에 시스템의 전체 자유에너지의 역학적인 부분과 정전기적 부분으로 구분한다[1,2]. 전압을 인가하는 것이 액적과 바닥이 접하는 부분의 접촉각을 변화시켜 액적의 형상이 변하게 된다는 관점이다. 다시 말해서 전계에 의해 액적에 작용하는 힘을 모두 액적의 표면력으로 빙여한다. 하지만, 액적은 전기적인 영향을 받지 않았을 때에도 체적력인 중력의 영향이 고려된다. 때문에 전압을 인가하였을 때에 나타나는 전자기력이 체적력으로 분포한다면 전기적인 영향을 단순히 표면력으로 표현한 것은 정확한 표현이라 할 수 없다.

본 논문에서는 최근 제시된 전자기 체적력 계산법에 의한 새로운 Kelvin식을 유도하며, 이를 이용하여 액적의 전자기력 밀도를 계산한다. 또한, 액적의 표면장력을 고려하여 유체 정역학적인 접근을 통해 액적 표면의 형상변화를 고찰한다.

2. 본 론

2.1 유체에서의 Kelvin Force Density의 표현

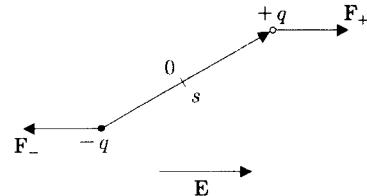
물 분자와 같은 극성분자는 전계 E 내에서 다음과 같은 회전력을 받는다.

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

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 다음과 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 다음과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 1> 쌍극자가 받는 힘

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

그림 1에서 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, ϵ_r 은 유전체의 비유전율을 나타낸다.

2.2 유체정역학적 표면 형성

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.

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

여기서 p 는 압력, ρ 는 질량밀도, \mathbf{g} 는 중력가속도, \mathbf{f}_e 는 전자기체적력밀도이다. 유체의 자유표면 S_1 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.

$$p_i = \int_{S_0}^{S_1} \mathbf{f}_b \cdot d\mathbf{l} + p_0 + p_{st} \quad (7)$$

여기서 p_0 는 대기 압력이고, p_{st} 는 유체의 곡률에 의한 압력이다.

2.3 표면장력의 고려

2.2절의 유체 정역학적 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 Δp (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

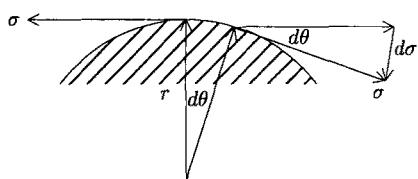
$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r\sigma \quad (8)$$

즉,

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

이 되어야 한다. 여기서 σ 는 물의 표면장력(20°C에서 0.0728[N/m])이다. 표면 장력 또한 다음과 같이 고려가 되므로 그림 2에서와 같이 압력으로 환산할 수 있다.

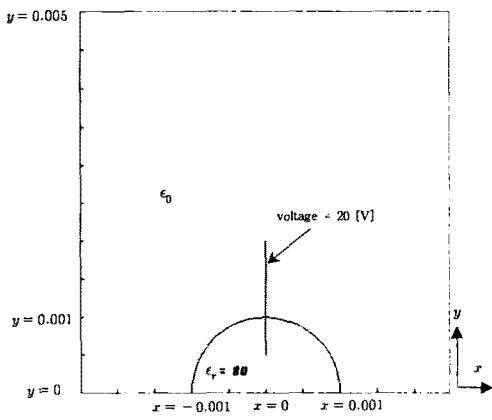
$$p_{st} = \frac{2d\sigma}{length} = \frac{2\sigma d\theta}{rd\theta} = \frac{2\sigma}{r} \quad (10)$$



<그림 2> 표면 장력에 의한 압력

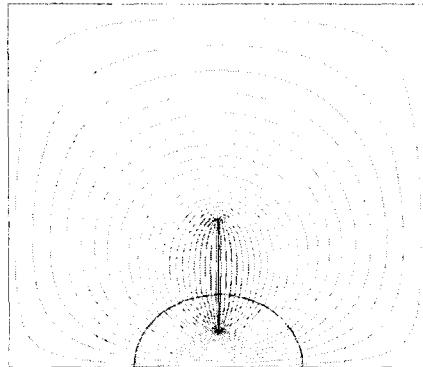
3. 시뮬레이션 및 고찰

그림 3에는 대기압에서 반지름이 1mm이고, 비유전율이 80인 액적에 20V의 전압이 인가된 해석모델을 나타내고 있다.



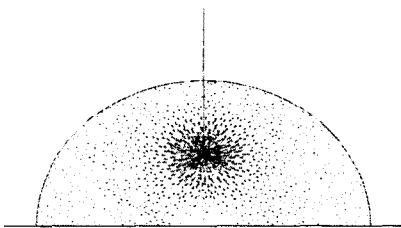
<그림 3> 해석 모델

그림 4는 액적 모델의 등전위 분포를 보이고 있다. 여기서, 액적부에 전계가 집중되는 것을 볼 수 있다. 전계의 변화에 의한 전자력분포를 예측할 수 있다.



<그림 4> 액적의 등전위 분포

그림 5는 Kelvin 전자력 밀도에 의한 각 요소에서의 전자력 밀도를 나타내었다. 전계의 변화에 의해 전계가 큰 방향으로 전자력을 받는 분포를 보이고 있다.



<그림 5> 액적의 전자력 밀도 분포

[참고문현]

- [1] R. Digilov, "Charge-Induced Modification of Contact Angle: The Secondary Electrocatalytic Effect", *Langmuir*, 16, 6719-6723, 2000
- [2] Frieder Mugele and Jean Christophe Baret, "Electrowetting: From basics to applications", *Journal of Physics: CONDENSED MATTER*, 17, R705-R774, 2005
- [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