

EWOD(Electro-Wetting on Dielectric)에 의한 초소수성 표면에서의 액적 이동과 부유물의 영향

변도영* · 이영종**

The droplet movement on the super-hydrophobic surface by the electro-wetting on dielectric and the effect of particles

Doyoung Byun*, Youngjong Lee**

Keywords : microflow(마이크로유동), micro-nozzle(마이크로노즐), micro-jetting(마이크로제팅), surface wettability(표면 습윤성), flow instability(유동불안정성)

Abstract

This article discusses about the droplet movement on the super-hydrophobic surface by the electro-wetting on dielectric and the effect of particles on the contact angle as well as the movement is investigated. The movement of droplet, driven by the principle of electro-wetting on dielectric, and the effect of particles are experimentally verified according to the driving voltage and different particles concentrations (fluorescent, charged particles). To increase the contact angle, the super-hydrophobic surface is fabricated and applied to the dielectric layer for the EWOD device. Then its performance is verified and discussed.

1. 서론

지금까지의 MEMS(micro electric mechanical systems) 기술의 발전으로 손바닥만 한 μ -Tas의 제작이 가능해지면서 그에 따른 다양한 목적의 마이크로 유체기기의 연구가 진행되고 있다.[1] 이러한 기술을 제어하기 위한 방법으로 미소유체역학과 관련된 연구가 진행되고 있으며 이러한 미소유체역학의 분야 중에서도 액적이송에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 액적이송은 액적을 생성, 원하는 위치의 이송 및 분사에 이르기까지 많은 응용이 되어 질 수 있기 때문에 중요하게 여겨지고 있다.

한편 액적의 습윤 현상의 해석은 스케일이 작아짐에 따른 계면현상이 전체 시스템의 거동에 영향을 주기 때문에 액적이송의 관점에서는 큰 영향을 주는 원인이 된다. 계면 장력이 발생하고 있는 모세관 속의 액체간의 전위차를 주어 발생하는 현상을 전기모세관 현상(electrocapillary)이라 하고, 이러한 계면의 장력을 임의의 전기를 가하여 변화시키는 것을 전기습윤(electrowetting)이라 한다. 이러한 전기 습윤 현상은 비교적 높은 전압을 이용

하여 계면 장력을 변화시키기 때문에 전극위에 유전 층이 되는 산화 실리콘(SiO₂)을 적층시킴으로써 전기 습윤의 요구 전압을 낮추게 된다. 이러한 원리를 EWOD(electrowetting on dielectric)이라 하고, 이러한 전기습윤 현상은 계면장력과 관련되어 액적의 접촉각과 관련된 식으로 나타내어지는데, 접촉각의 증가를 위하여 Teflon AF 코팅과 같은 무정형 플루오르 폴리머를 코팅함으로써 소수성 표면으로 제작하여 계면 현상을 극복하는 방법으로 쓰이게 되었다. 이러한 전기 습윤 현상을 통하여 보다 질제적인 액적의 생성, 이송 및 분사의 응용이 가능해 지는 것이다.[2][3]

위의 연구와 더불어 최근 초소수성 표면에 관한 연구도 함께 진행되고 있는데 초소수성 표면의 경우 접촉각이 150° 이상인 경우를 이야기 되는데, 생체모사와 관련된 LOOTS 효과와 관련되어 많은 연구가 진행 중이다.[5] 초소수성 표면의 경우 액적이 중력이 무시될 정도의 작은 크기의 액적인 경우는 중력에 대한 영향보다 액적과 표면 사이의 표면장력의 영향을 더 큰 인자로 생각하기 때문에 눈이나 비 또는 산화의 과정이 초소수성 표면에서는 억제 및 감소되는 구조를 가진 표면인데, 이러한 초소수성 표면은 표면의 거칠기를 높이고 표면의 에너지를 낮춤으로써 만들어 질 수 있다. 본 논문은 액적의 접촉각을 증가시키기 위한 목적으로 MEMS공정을 통하여 소수성표면을 임의의 구조를 가진 초소수성 표면(super-hydrophobic surface)으로 제작하여 액적의 접촉각을 증가시켜 실험을 하였고 이를 통하여 액적의 이송과 관련된 분야의 응용에 기여할 수 있을 것이라 생각한다.[4]

* 건국대학교 항공우주공학과, dybyun@konkuk.ac.kr

** 건국대학교 기계항공공학부, nonpotato81@msn.com

초소수성 표면 위의 EWD현상의 연구를 통하여 마이크로 스케일에서의 액적의 가장 큰 관심사인 계면장력의 영향을 해결함으로써 보다 발전된 Lab-on-a-chip의 구조에 대하여 연구를 진행 할 것이다.

이와 더불어 액적 내 입자의 영향을 알아보기 위하여 탈이온화 된 물과 Caboxylate Modified Latex(CML)와 같은 입자를 이용하여 전도성 입자들이 전기 습윤 및 액적이송에 어떠한 영향을 끼치는가에 대한 실험을 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 EWOD(Electrowetting-on-dielectric)

소량의 액적이 소수성의 표면에 위치해 있을 때, 액적의 모양은 액적의 부피와 액적과 절연체 표면사이의 접촉각으로 모양이 결정된다. 액적의 부피가 마이크로 리터의 소량인 경우 중력의 영향은 무시되며 액적의 모양은 구의 모양으로 형성 된다. 액적의 평형 접촉각은 절연체 표면의 상태에 따라 결정이 되는데 이상적이 절연체 표면의 경우 접촉각은 Young의 방정식에 따라 액적과 공기 그리고 표면의 계면 힘 평형의 관계식에 따라 다음 식과 같이 나타난다.

$$r_{lv}\cos\theta = r_{sv} - r_{sl} \quad (1)$$

위와 같은 액적에 전기를 가하는 전기습윤 장치는 액적과 공기 그리고 절연체 표면으로 구성되어 리프만 방정식으로 표면장력을 구할 수 있다.

$$r = r_0 - \frac{1}{2}cV^2 \quad (2)$$

위의 식에서 유전체의 전기 용량은 아래와 같이 표현된다.

$$c = \epsilon_0\epsilon/d \quad (3)$$

ϵ_0 는 진공 상태의 유전율(permittivity), ϵ 는 유전 물질의 유전 상수(dielectric constant), d 는 유전 층의 두께를 말한다.

기존의 식에서의 전기 습윤 현상은 절연체가 캐패시터의 역할을 하여 전기적인 힘으로 액적을 변화시켰으나 이로 인하여 생기는 전기이중층 현상은 낮은 전압에서 작동을 하는 단점이 있었다. 그러나 재료과학의 발전으로 위의 절연체의 역할을 대신 할 물질이 발견되고, 이러한 물질은 전기 이중층보다 두껍고 절연체를 통과하여 전압강하가 일어나기 때문에 높은 전압을 가하여 액적의 접촉각을 변화시키는 것이 가능해 졌다. 이와 같은 현상을 EWOD(electrowetting on dielectric)라 한다. 액적과 공기의 계면 현상은 캐패시턴스를 고려함으로써 무시될 수 있고, 평행한 판의 캐패시터의 면적은 액체와 표면간의 넓이와 같게 된다. 따라서 접촉각 θ_e 와 가해지는 전압 V 의 관계식으로 다시 정리 될 수 있다.[6]

$$\cos\theta_e = \cos\theta_0 + \frac{\epsilon_0\epsilon_r}{2dr_{lv}} V^2 \quad (4)$$

2.2 초 소수성표면(Super-hydrophobic surface)

접촉각은 표면의 습윤 특성을 나타내며, 액적의 접촉각이 90°

이상이 되면 습윤 또는 친수성 이라 하고, 액적의 접촉각이 90° 이상이 되면 소수성이라 정의 된다. 그리고 초 소수성 물질의 경우 접촉각은 150°이상이 된다. 소수성 물질은 접촉각이 크기 때문에 물과 끌어당기는 것으로 오해 될 수 있으나, 소수성 표면에서의 접촉각은 물과 표면에서의 분자의 결합력이 물의 분자 결합력 보다 작기 때문에 위와 같은 현상이 발생하게 된다. 표면장력은 표면에서의 분자사이의 힘을 명시하고 있고, 표면 면적과 에너지의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$r = \frac{dW}{dA} \quad (5)$$

거시적 공동영역의 액적과 초소수성 표면은 표면과 공기의 혼합으로써 고려되어 왔다. 거시적 평형 접촉각은 액적과 표면 그리고 액적과 공기 사이의 장력의 평균으로 계산되어 지고, 그 결과는 Cassie and Baxter 방정식으로 알려져 있다.

$$\cos\theta_c = f_1\cos\theta_0 - f_2 \quad (6)$$

f_1 은 표면의 fractional area, f_2 는 공기의 fractional area 이다.

$f_1+f_2=1$ 이기 때문에 위의 Cassie and Baxter 방정식은 식(7)로 다시 표현 될 수 있다.

$$\cos\theta_c = f(\cos\theta_0 + 1) - 1 \quad (7)$$

f 는 표면과 액적의 접촉부분의 투영된 면적과 전체 액적의 접촉부분의 투영된 면적으로 나누어 질 수 있다.[6]

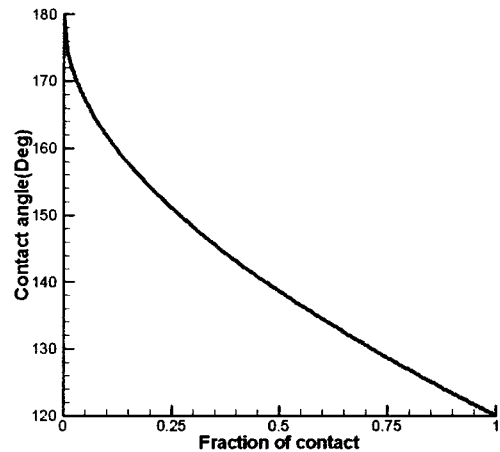


Fig. 1: Plot of apparent contact angle vs fraction of contact[7]

식 (7)의 f 값을 계산한 Fig 1.에 따르면 소수성 구조의 fractional contact는 예측 될 수 있다. 위의 방정식에 따르면 값이 증가 한다면 f 값은 작아지게 되는데 이는 접촉각이 작아지는데 영향을 주어 표면장력을 작아지게 만드는 것이다.

3. 실험 과정

3.1 접촉각 측정

전기습윤 장치를 만들기 위하여 MEMS공정을 통하여 Si 웨이퍼 위에 절연 층을 P-5000장치를 이용하여 SiO2를 0.1 μ m와 1 μ m로 적층 시켰고 그 위를 Teflon(AF1600)를 200Å의 두께로

spin coating을 하였다

위의 장치를 이용하여 액적에는 (-)극, Si 웨이퍼에는 (+)극을 연결하여 액적의 접촉각 변화를 관찰하고, 전압의 범위를 DC(15~35V)로 변화시켜 실험 하였다. 액적의 접촉각의 변화를 관찰하기 위하여 CCD카메라를 이용하여 측정 하였고, 액적의 제적은 5 μ l로 실험하였다.

액적의 종류를 탈 이온 화 된 물과 Carboxylate Modified (CML) 4% 그리고 CML을 탈 이온 화 된 물에 1%로 희석 시켜 실험을 수행하였다.

3.2 초소수성 표면 EWOD 장치 MEMS 공정

액적 이송을 위한EWOD 장치를 만들기 위해서 MEMS 공정을 이용하였다. 공정은 소수성 표면(Hydrophobic surface)과 초 소수성표면(Super-hydrophobic surface)을 만들기 위하여 두 가지 방법으로 나누어 공정을 진행 하였다. 4인치 Quartz웨이퍼 위에 Al을 Evaporation 시킨 후 PR을 코팅 한 후 Alingner(MA-6)작업을 통해 Al을 패턴 작업을 하였다. 첫 번째로 소수성 표면을 만들기 위해서 SiO2를 0.1 μ m로 Deposition 하여 절연 층을 형성시키고, Spin coater를 이용하여 Teflon AF를 200Å의 두께로 코팅을 하였다. 다음으로 초소수성 표면을 만들기 위하여 SiO2를 3 μ m로 Deposition 하여Dielectric layer를 형성시킨 후 20 μ m와 10 μ m의 초소수성 구조를 만들기 위하여 마스크(자체제작)를 이용하여 패턴을 만들고, Spin coater를 이용하여 Teflon AF를 200Å의 두께로 코팅을 하였다. 이 두 가지의 EWOD 장치를 통하여 소수성 표면과 초 소수성 표면에서의 액적의 이동이 어떠한 특성을 가지는 가에 대하여 관찰 하였다.

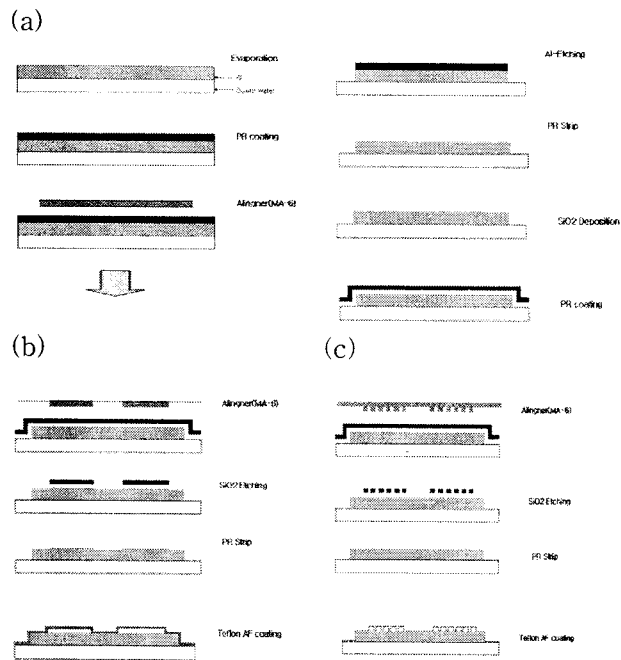


Fig 2. Fabrication process (b)Hydrophobic surfaces, (c) Super-hydrophobic surfaces

4. 실험 결과

4.1 직류 전기장 하에서 전기 흡윤

직류전기 장에서의 전기 흡윤은 많은 연구가 이루어져 있었고 실험적으로도 다양한 형태의 연구가 진행되고 있다. 이론적인 전기흡윤의 방정식은 위에서 유도된 (4)의 식을 이용하여 결

과를 예측하였다.

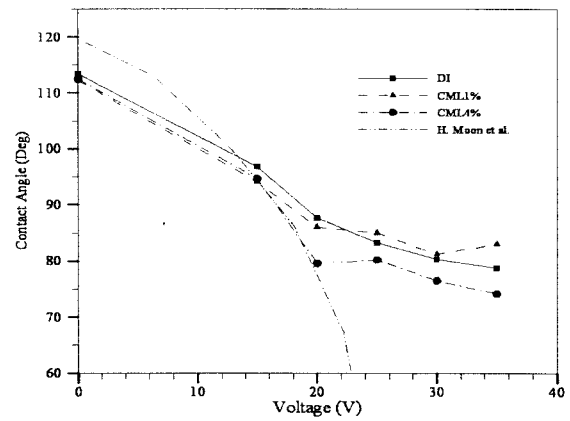


Fig 3. Contact angle dependence on the voltage, DashDotDot lines are based on Eq. (4), DI water(square), CML 1%(triangle), CML 4%(circle)

위의 그림은 전기 흡윤의 모델을 SiO2를 0.1 μ m로 Deposition 시킨 후 그 위에 Teflon(AF1600)를 200Å의 두께로 spin coating 한 뒤 전기 흡윤을 수행 한 결과이다. 위의 그래프를 통하여 탈 이온 화 된 물과 CML의 농도에 따른 영향을 알아 볼 수 있는데, 탈 이온 화 된 물의 경우 전압의 변화에 따라서 접촉각이 일정하게 감소하는 것을 보여 주고 있다.

그러나 CML의 경우 4%, 1% 모두 15~20V에서 접촉각이 큰 변화가 일어나고 20~25V의 범위에서는 접촉각의 변화가 크게 일어나지 않는 것을 알 수 있다. CML의 특성인 음극(-)로 대전된 입자의 성질 때문에 4% 원액인 경우 탈 이온 화 된 물보다 20~35V의 범위에서는 접촉각이 더 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 그러나 탈 이온화 된 물로 희석된 1%의 CML의 경우 25~35V의 범위에서는 탈 이온 화 된 물의 접촉각 보다 작게 나타났다.

위와 같은 현상은 실험을 수행하는 동안 표면에 남아있게 되어 표면을 친수성으로 변화시키는 CML의 성질과는 관련된 결과로 생각되어 지고, CML이 음극으로 대전된 입자를 포함하고 있기 때문에 접촉각의 이력현상은 탈 이온 화 된 물의 경우보다 심하게 나타났다. 따라서 이력현상의 원인으로 연구된 전기흡윤 과정에서의 Trapped charge의 현상을 발생시키는 원인으로 1%로 희석된 액적의 접촉각이 탈 이온 화 된 물보다 작은 것을 설명할 수 있을 것이다.

그러나 20V에서 두 종류의 액적 모두의 접촉각의 급격한 변화를 보이는 것에 대한 연구는 위에 설명된 CML자체의 성질로는 충분히 설명될 수 없으므로 추후 연구에서 보다 구체적으로 다루어 져야 할 것이다.

4.2 초소수성 표면에서의 전기흡윤

초소수성 표면에서의 전기 흡윤 모델은 Fig 2의 제작 공정에 따른 장치를 사용하였다. 소수성 구조의 영향으로 액적과 표면 사이의 표면장력이 작아지게 되어 전기 흡윤을 수행하는 경우 액적의 접촉각의 변화가 용이 하게 되는 원인으로 작용한다.

초소수성 표면을 제작하기 위하여 이론적인 방정식(7)의 f(Fraction of contact)를 고려하면, 이론적인 식을 통하여 초소수성의 구조의 경우 f값은 0.3 이하가 되어야 한다. 실험 모델의 f

값을 계산 하였을 때 0.09로 초소수성의 성질을 가져야 하나 실험의 모델은 접촉각이 120° 정도 되었으므로 f값은 1이 되는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다. 따라서 초소수성 구조의 낮은 표면 장력이 전기습윤 현상 주는 영향을 실험적으로 증명할 수는 없었고, 이후의 연구에서 초소수성 구조의 크기를 개선하여 실험하도록 하겠다.

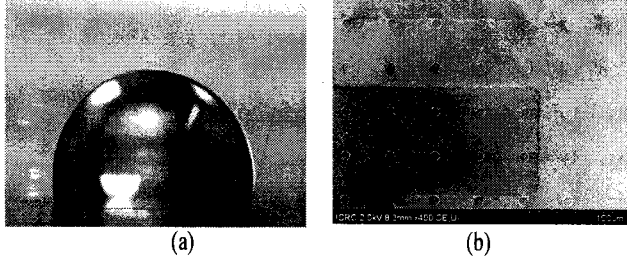


Fig 4. (a) Contact angle (b) Super-hydrophobic surfaces (SEM image)

5. 결론

본 연구에서는 전기 습윤 현상의 실험을 통하여 액적의 변화에 관하여 연구하였다. 액적을 탈이온화 된 무과 음극으로 대전된 성질을 가지는 Caboxylate Modified Latex(CML)를 전압을 변화시키에 따른 접촉각을 측정함으로써 전기 습윤 현상에서의 부유물의 영향을 알아보았다. 그리고 초소수성 표면에서의 액적의 이송이 더 자유로울 수 있는지에 관하여 실험을 하였다.

CML의 경우 4%와 1% 모두 15~20V의 범위에서 접촉각이 큰 변화가 일어났고, 20~25V의 범위에서는 접촉각의 변화가 크게 일어나지 않았다. 이를 통하여 음극으로 대전된 부유물이 전기 습윤 현상에 영향을 미쳐서 탈이온화 된 물보다 낮은 전압에서 보다 큰 접촉각의 변화를 일으키는 것을 알 수 있었고, CML 4%의 경우는 포화 접촉각도 조금 더 낮출 수 있음을 실험을 통하여 보여 주었다.

본 논문에서 수행된 전기 습윤 현상에서의 부유물의 영향을 통하여 기존의 많은 연구가 진행되고 있는 미소 유체 유동에서의 부유물의 영향을 연구하는데 기초적인 자료가 될 수 있을 것으로 생각한다. 그러나 명확하게 밝혀지지 않은 음극으로 대전된 입자의 영향은 전기 습윤 현상의 절연 층에서의 Trapped charge와 관련 되는 것이므로, 이후의 연구에서 다루어져야 할 사항일 것이고, 실험을 통하여 명확하게 증명되지 않은 초소수성 표면에서의 전기습윤 현상 또한 연구되어야 할 사항이 되겠다.

후기

본 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었으며(KRF-2005-003-D00051) NT-IT 공동 시설 이용지원 프로그램의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

[1] Freemantle, M., 1999, Chem. Eng. News, 77(8)
 [2] C. Quilliet, and B. Berge (2001) " Electrowetting : a recent outbreak," Current Opinion in Colloid & Interface Science, 6(1), 34-39.
 [3] H. Moon, S. K. Cho, R. L. Garrell, and C.-J. Kim, 2002, "Low voltage electrowetting-on-dielectric", J. Appl. Phys. 92, 4080-4087

[4] W. Shen, J. Kim, and C.-J. Kim, "Controlling the Adhesion Force for Electrostatic Actuation of Microscale Mercury Drop by Physical Surface Modification", IEEE Conf. MEMS, Las Vegas, NV, Jan. 2002, pp. 52-55.
 [5] Neelesh A. Patankar, 2003, "On the Modeling of Hydrophobic Contact Angles on Rough Surfaces", Langmuir, 19, 1249-1253
 [6] Altti Torkkel, 2003, "Droplet microfluidics on a planar surfaces", pp. 26-27
 [7] Kim, J. and Kim, C.-J., 2002, "Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics," Proc. IEEE MEMS 2002, pp. 479-482.