

절연층에 따른 액적의 전기습윤 특성 분석

최진호*, 김규만*^{#,}

*경북대학교 기계공학과

Characteristic Analysis of Electrowetting on Dielectric Layer

Jin Ho Choi*, Gyu man Kim*^{#,}

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

(Received 3 June 2019; received in revised form 10 June 2019; accepted 13 June 2019)

ABSTRACT

Electrowetting on dielectric (EWOD) is a unique method of shape control of small-volume droplets in microfluidic biochips that relies on modification of surface wetting characteristics using electrical methods. In this study, the droplet shape control on various dielectric surfaces by the EWOD and the effect of droplets on the contact angle as well as the shape were investigated. The droplet used in the experiment was on a sample substrate with 5 μ l of de-ionized water (DIW) using a micropipette, and wettability was measured with a contact angle meter. This study is expected to be helpful for the development of various micro-total-analysis-systems (μ TAS) and microfluidic systems with MEMS technology.

Key Words : Electrowetting(전기습윤), Wettability(젖음성), Contact Angle(접촉각), Droplet(액적), Dielectric Layer(절연층)

1. 서 론

MEMS(Micro electric mechanical systems) 기술의 발달과 Microfluidics 을 활용한 미세유체의 분석 시스템에 관한 연구가 진행되면서 액적(Droplet)의 생성과 위치 및 이송에 관한 제어방법의 중요성이 커짐에 따라 다양한 액적 제어기술의 개발이 요구되었다. 이러한 기술의 하나로 외부에서 가해진 전기에 의하여 젖음성(Wettability) 특성을 변화시켜 액적의 모양과 이송 제어가 가능한 전기습윤(Electrowetting)이 있으며 이를 활용한 다양한 연구가 진행되었다.

전기습윤은 액적에 임의의 전기를 가하여 계면의 장력을 변화시켜 액적의 모양이 변하는 것이며, 액적과 소수성 표면 사이에 절연층을 삽입 후 전압을 인가하여 전기습윤의 요구 전압을 낮추어 액적의 젖음성 특성이 변하는 현상을 EWOD(Electrowetting on dielectric)^[1-4]라 한다. 이러한 EWOD는 개별 액적을 정확하게 제어할 수 있는 장점을 가지며, MEMS 및 Microfluidics분야에서 샘플이나 시약이 포함된 액적의 개별 유체 작동 메커니즘^[5,6]으로 활용된다. 또한, 전압인가 조건에 따른 액적의 젖음성 변화^[4,7,8]를 이용하면 액적의 형상을 제어할 수 있으며 미세유체를 혼합하는 마이크로 믹서와 액적의 움직임에 이용한 마이크로 유체모터로 응용^[9-12]이 가능하고 디스플레이 및 가변형 유체렌즈로 활용^[13-15]할 수 있다. 현재는 MEMS 및 Microfluidics 분

Corresponding Author : gyuman.kim@knu.ac.kr

Tel: +82-53-950-7570, Fax: +82-53-950-6550

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

야에서 EWOD를 적용하여 극소량의 유체를 이동, 분리, 혼합 등을 할 수 있는 시스템으로 랩온어칩(Lab-on-a-chip) 혹은 바이오칩(Biochip)과 같은 생화학 분석 시스템으로 연구^[13,19-18]가 진행되고 있다. 그리고 연속적 EWOD 효과를 이용한 마이크로 펌프 혹은 마이크로 모터에 관한 연구^[9-12]와 액체금속(Liquid metal)^[19]을 사용한 다양한 센서 및 디지털 액츄에이터^[20]의 개발로 EWOD 효과에 관한 연구가 보고되고 있다.

본 연구에서는 EWOD 실험에 보편적으로 사용되는 절연물질인 Parylene-C와 MEMS 및 Microfluidics 공정에서 많이 사용되는 절연물질인 SU-8과 PDMS(Polydimethylsiloxane)를 이용하여 동일한 조건(DC전압을 이용한 액적의 접촉각 측정)에서 EWOD 현상을 구현하고 이를 통해 각각의 절연층에 대한 EWOD 효과를 실험을 통해 분석하였다. 실험에 사용된 SU-8 과 PDMS는 Parylene-C와 비교하여 마이크로 구조물 제작이 용이하며, 쉽게 빠르게 절연층을 증착 할 수 있는 장점을 가진 절연물질로 이를 이용한 EWOD 실험은 추후 MEMS 기술이 적용된 다양한 분석용 미세유체 시스템 개발에 많은 도움이 될 것으로 예상된다.

2. EWOD(Electrowetting in dielectric)

2.1 EWOD 장치 설계

일반적인 EWOD 실험은 Parylene-C 절연층 위에 소수성 표면을 형성하기 위하여 Teflon(AF1600S, Dupont)을 증착하여 액적의 접촉각을 측정한다. 접촉각은 절연층 표면의 젖음성 특성을 나타내며, 액적의 접촉각이 90°이하가 되면 친수성(Hydrophilic), 그 이상이 되면 소수성(Hydrophobic)이라 한다. 또한 접촉각이 150°이상이 되면 초소수성(Ultra-hydrophobic)이라 한다.

EWOD 실험은 절연층 표면에 소수성 물질인 Teflon을 증착한 기판을 제작 후 직류전압(DC voltage)의 (+)극을 연결하고, 기판 위에 액적을 올린 후 백금 전극을 직류전압의 (-)극으로 연결하여 EWOD 현상을 구현하여 액적의 접촉각 변화를 확인한다. Fig. 1 는 EWOD 실험의 개략도를 보여주

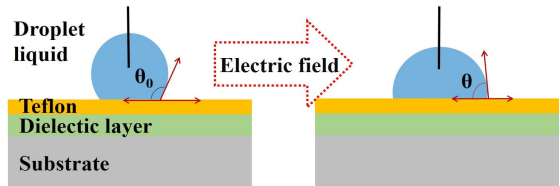


Fig. 1 Schematic diagram of electrowetting on dielectric(EWOD)

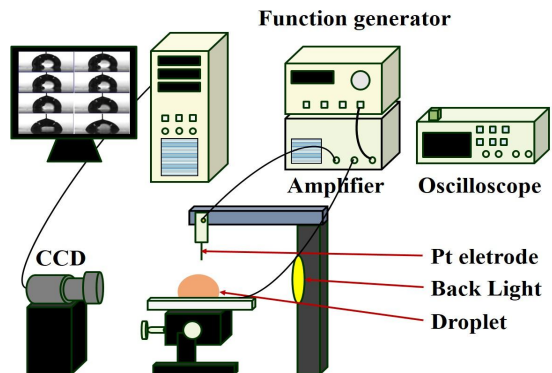


Fig. 2 Contact angle measurement set-up

고 있으며, 소수성 표면 위의 액적에 직류전압이 인가되면서 액적의 젖음성이 변화되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2 는 EWOD 실험 장치와 접촉각 측정 시스템의 모식도를 보여주고 있다. EWOD 실험 장치에 사용되는 접촉각 측정 시스템은 CCD 카메라, 마이크로 스테이지, 마이크로 피펫, 백라이트 등으로 구성되어 있다.

2.2 EWOD 접촉각 측정

접촉각은 기체, 액체, 고체 간의 표면 에너지가 열역학적 평형을 이루고 있을 때 형성되며, 액적과 공기 그리고 표면의 계면 힘이 이루는 각으로 액적의 접촉각은 절연체 표면의 상태에 따라 결정이 되며 이상적인 절연체 표면의 경우 접촉각은 Young의 방정식에 따라 식(1)의 관계식으로 나타낸다. 액체의 표면장력을 γ_{LV} , 고체의 표면장력을 γ_{SV} , 고체/액체 계면장력을 γ_{SL} 이라 할 때, 평형을 이루기 위해 다음과 같이 Young의 방정식을 만족하여야 한다.(Fig. 3)

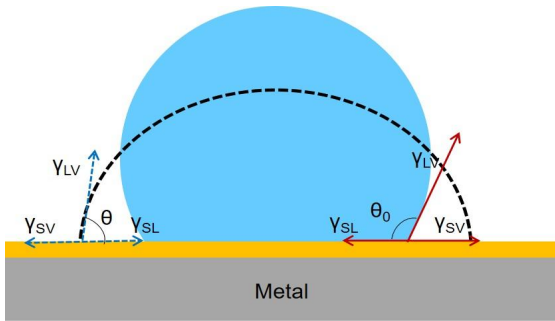


Fig. 3 Droplet on a surface(three interfacial tensions to maintain tangent force equilibrium)

$$\gamma_{LV}\cos\theta = \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (1)$$

EWOD에 의해 구현되는 액적의 접촉각 변화는 Lippmann-Young 방정식에 의해 접촉각과 전압의 관계식인 식(2)로 나타낸다. ϵ 는 유전 물질의 유전 상수(Dielectric constant), ϵ_0 는 진공 상태의 유전율 (Permittivity), d 는 유전 층의 두께이며, 접촉각 θ 와 전압 V 의 관계식은 다음과 같다.

$$\cos\theta(V) = \cos(\theta_0) + \frac{\epsilon\epsilon_0}{2d\gamma_{LV}} V^2 \quad (2)$$

본 실험에는 동일한 두께를 가지는 세 가지 다른 절연층을 가지는 소수성 표면의 샘플 기판을 이용하여 EWOD 실험을 수행하고 EWOD 현상의 접촉각 변화는 접촉각측정기(Contact angle meter, GBX Digidrop)로 측정하였다. 실험에 사용된 액적은 $5\mu\text{l}$ 의 탈이온수(De-ionized water)로 마이크로 피펫을 이용하여 샘플 기판 위에 형성하였고, 실험환경은 대기압상태에서 온도 $22\pm 1^\circ\text{C}$, 습도는 $35\pm 5\%$ 조건을 유지하면서 세 가지 다른 절연층을 가지는 소수성 표면의 샘플 기판의 접촉각을 측정하는 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절연층을 가지는 샘플 기판 제작

일반적인 EWOD 실험은 Parylene-C를 절연층으로

Table 1 Various dielectric materials

Substrate material	Type	Dielectric constant	Deposition
Parylene-C	Polymer	3.15	Chemical vapor deposition
SU-8	Epoxy	3.0	Spin coating
PDMS	Silicon elastomer	2.8	Spin coating

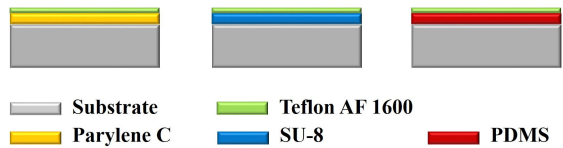


Fig. 4 Fabrication process of substrate with dielectric materials

사용하며, 그 위로 Teflon(AF1600S, Dupont) 박막을 증착하여 기판을 제작한다. 그리고 제작된 기판 위로 탈이온수 액적을 올리고 직류전원을 이용하여 젖음성을 측정한다. 본 연구에서는 절연물질에 따른 젖음성 특성을 평가하기 위해 Table 1의 Parylene-C, SU-8, PDMS를 $5\mu\text{m}$ 두께로 절연층을 형성하고 각 절연층 위로 Fig. 4와 같이 소수성 층을 형성하기 위하여 Teflon을 100nm 두께로 증착하여 EWOD 실험을 위한 세 가지의 다른 절연층을 가지는 샘플을 제작하였다. Parylene-C는 폴리머(Polymer) 소재의 절연물질로 열기상증착법을 이용하여 증착하고, SU-8 은 에폭시(Epoxy) 소재의 절연물질로 스펀코팅으로 증착하였다. 또한, PDMS는 실리콘 중합체(Silicon elastomer)로 SU-8과 같은 스펀코팅으로 증착하였다. 제작된 실험 샘플은 직류전원을 이용하여 각 샘플에 따른 접촉각을 측정하여 절연층에 따른 젖음성 특성을 분석한다.

3.2 실험결과

Fig. 5는 Parylene-C, SU-8, PDMS 절연층을 가지는 각 샘플 기판에 Frequency를 1KHz 로 고정하고 직류전압을 $0\text{V}\sim 180\text{V}$ 로 변화할 때 탈이온수 액적의

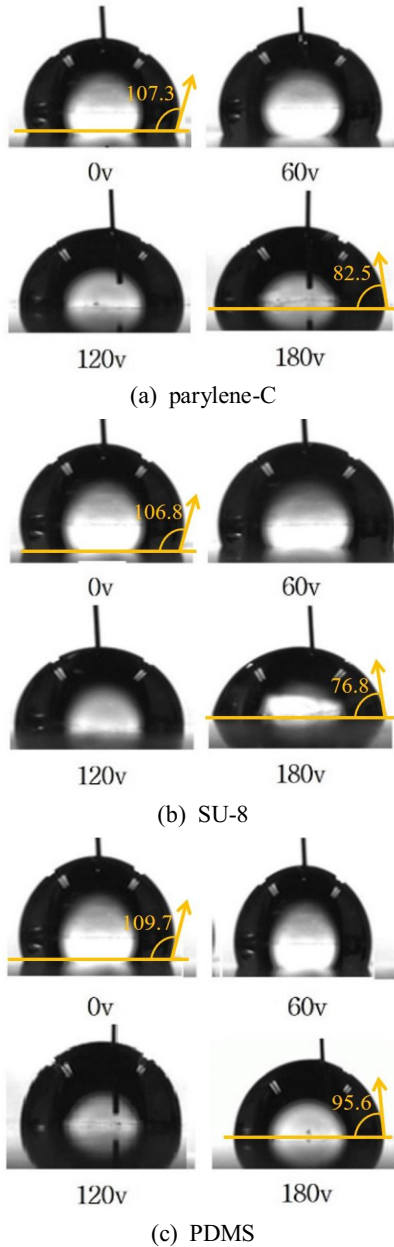


Fig. 5 Voltage dependence of the shape of droplet at fixed frequency(1KHz)

젖음성을 측정된 결과이다. 실험에 사용된 액적은 마이크로 피펫을 이용하여 탈이온수를 $5\mu\text{l}$ 로 고정하여 동일한 부피의 액적으로 실험하였으며, 사용된

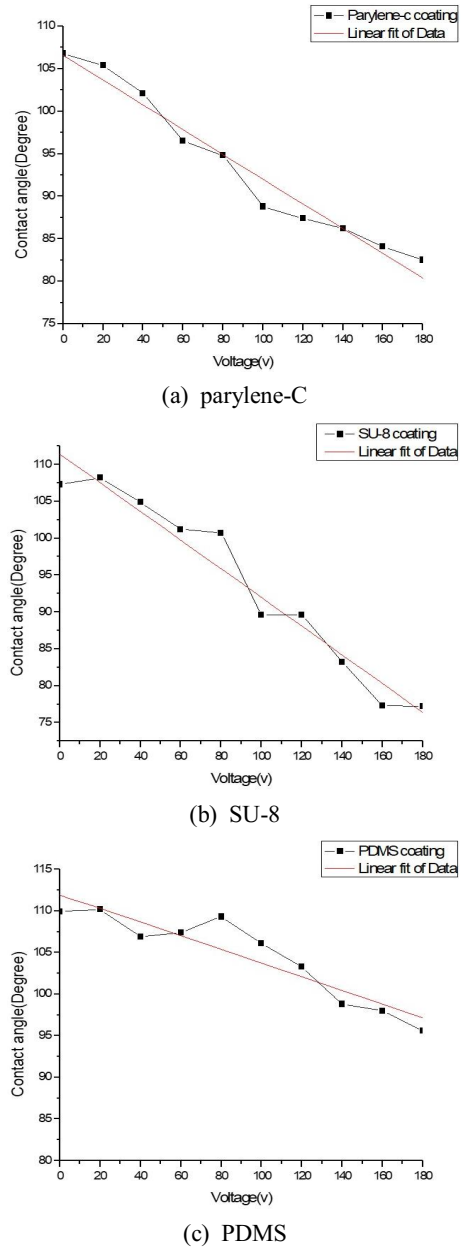


Fig. 6 Contact angle result of dielectric materials substrate

백금 전극의 직경은 $100\mu\text{m}$ 이다. Fig. 5의 실험결과 각 샘플 기판에서 직류전압이 변화함에 따라 탈이온수 액적의 모양이 변화하면서 접촉각이 낮아짐을

이미지를 통해 확인할 수 있었다. Fig. 6은 Parylene-C, SU-8, PDMS 절연층에서 직류전압의 변화에 따른 접촉각의 변화를 그래프로 나타낸 결과이다. Parylene-C 샘플 기판은 0V에서 초기 접촉각이 107.3°로 측정되었고, 직류전압이 180V로 상승되었을 때 82.5°로 측정되었다. 직류전압이 증가할수록 접촉각이 24.8 낮아지면서 젖음성이 변화되는 것을 확인할 수 있다. SU-8 샘플 기판은 0V에서 접촉각이 106.8°로 측정되었고, 직류전압이 180V가 되었을 때 측정된 접촉각은 76.8°로 직류전압이 증가할수록 접촉각이 30°낮아지면서 젖음성이 변화되는 것을 확인하였다. 그리고 PDMS 샘플 기판은 0V에서 접촉각이 109.7°이며, 직류전압이 180V일 때 접촉각은 95.6°로 직류전압이 증가할수록 접촉각이 14.1°로 낮은 변화를 보였다. 3가지 종류의 샘플 기판을 이용한 EWOD 실험의 접촉각 측정에서 Parylene-C와 SU-8은 비슷한 결과 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, PDMS는 접촉각의 변화가 작은 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 보면 Parylene-C의 절연층을 대체 할 수 있는 물질로 SU-8이 활용 가능함을 확인할 수 있으며, PDMS는 접촉각의 변화가 작기는 하지만 EWOD 실험에 사용이 가능함을 확인할 수 있었다. 특히 SU-8은 MEMS 공정을 이용한 다양한 형상의 미세패턴 제작 및 미세유체구조 제작이 가능한 재료이며, 바이오 응용 연구의 미세유체장치를 활용한 모터, 액추에이터, 믹서, 미세유체 렌즈 등과 같은 다양한 분야의 진단과 분석이 가능한 시스템으로 적용이 가능할 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서는 여러가지 절연층에서 EWOD 현상을 구현하기 위하여 절연층을 Parylene-C, SU-8, PDMS로 제작하고, Teflon 코팅 후 액적의 접촉각을 측정하였다. 그 결과 Parylene-C를 이용한 EWOD와 SU-8을 이용한 EWOD 실험에서의 접촉각 측정 결과는 비슷함을 확인할 수 있었으며, PDMS를 이용한 EWOD 실험의 측정값은 다른 두 종류의 절연층에 비해 접촉각의 변화가 작음을 확인할 수 있었다. 이를 이용하여 일반적인 EWOD

방법인 Parylene-C 절연층을 이용한 실험을 대체하는 방법으로 MEMS 공정에서 미세패턴의 제작과 구조물 제작으로 많이 사용되는 SU-8을 이용한 EWOD 실험이 가능함을 알 수 있었다. 또한, SU-8을 절연층으로 이용한 EWOD 실험은 절연층 제작이 스�핀코팅을 이용하기 때문에 쉽고 간단한 장점을 가진다. 이러한 SU-8의 장점을 이용하면 미세유체를 활용한 유체렌즈 및 디스플레이 장치, 마이크로 유체모터, 액추에이터 등의 제작이 가능하며 Bio-MEMS 및 Microfluidics 분야와 결합하여 바이오 시약 분석 및 진단 시스템으로 적용이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

“이 연구는 2018학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Pollack, M. G., Fair, R. B. and Shenderov, A. D., “Electrowetting-based actuation of liquid droplets for microfluidic applications,” *Applied Physics Letters*, Vol. 77, No. 11, pp. 1725-1726, 2000.
2. Lee, J., Moon, H., Fowler, J., Schoellhammer, T. and Kim, C. J., “Electrowetting and electrowetting-on-dielectric for microscale liquid handling,” *Sensors and actuators A: physical*, Vol. 95, No. 2-3, pp. 259-268, 2002.
3. Kang, K. H., “How electrostatic fields change contact angle in electrowetting,” *Langmuir*, Vol. 18, No. 26, pp. 10318-10322, 2002.
4. Moon, H., Cho, S. S., Garrell, R. L. and Kim, C. J., “Low voltage electrowetting-on-dielectric,” *Journal of applied physics*, Vol. 92, No. 7, pp. 4080-4087, 2002.
5. Cho, S. K., Moon, H. and Kim, C. J., “Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting-based actuation for digital

- microfluidic circuits,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 70-80, 2003.
6. Wheeler, A. R., Moon, H., Kim, C. J., Loo, J. A. and Garrell, R. L., “Electrowetting-Based Microfluidics for Analysis of Peptides and Proteins by Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Mass Spectrometry,” *Analytical Chemistry*, Vol. 76, No. 16, pp. 4833-4838, 2004.
 7. Jones, T. B., Fowler, J. D., Chang, Y. S. and Kim, C. J., “Frequency-Based Relationship of Electrowetting and Dielectrophoretic Liquid Microactuation,” *Langmuir*, Vol. 19, No. 18, pp. 7646-7651, 2003.
 8. Hong, J. S., Ko, S. H., Kang, K. H. and Kang, I. S., “A numerical investigation on AC electrowetting of a droplet,” *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 8, No. 2, pp. 263-271, 2008.
 9. Lu, H. W., Bottausci, F., Fowler, J. D., Bertozzi, A. L., Meinhart, C. and Kim, C. J., “A study of EWOD-driven droplets by PIV investigation,” *Lab on a Chip*, Vol. 8, No. 3, pp. 456-461, 2008.
 10. Lee, K. Y., Park, S., Lee, Y. R. and Chung, S. K., “Magnetic droplet microfluidic system incorporated with acoustic excitation for mixing enhancement,” *Sensors and actuators A: physical*, Vol. 243, pp. 59-65, 2016.
 11. Chung, S. K., Rhee, K. and Cho, S. K., “Bubble Actuation by Electrowetting-on-Dielectric (EWOD) and Its Applications: A Review,” *International Journal OF Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 11, No. 6, pp. 991-1006, 2010.
 12. Lee, S. J., Lee, S. and Kang, K. H., “Droplet jumping by electrowetting and its application to the three-dimensional digital microfluidics,” *Applied Physics Letters*, Vol. 100, No. 8, Paper No. 081604, 2012.
 13. Zhao, Y. P. and Wang Y., “Fundamentals and Applications of Electrowetting: A Critical Review,” *Reviews of Adhesion and Adhesives*, Vol. 1, No. 1, pp.114-174, 2013.
 14. Krupenkin, T., Yang, S. and Mach, P., “Tunable liquid microlens,” *Applied Physics Letters*, Vol. 82, No. 3, pp. 316-318, 2003.
 15. Kuiper, S. and Hendriks, B. H. W., “Variable-focus liquid lens for miniature cameras,” *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 7, pp. 1128-1130, 2004.
 16. Barbulovic-Nad, I., Yang, H., Park, P. S., Wheeler, A. R., “Digital microfluidics for cell-based assays,” *Lab on a Chip*, Vol. 8, No. 4, pp. 519-526, 2008.
 17. Fair, R. B., “Digital microfluidics: is a true lab-on-a-chip possible?,” *Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 3, No. 3, pp. 245-281, 2007.
 18. Haeberle, S. and Zengerle, R., “Microfluidic platforms for lab-on-a-chip applications,” *Lab on a Chip*, Vol. 7, No. 9, pp. 1094-1110, 2007.
 19. Baek, S., Won, D. J., Kim, H. and Kim, J., “Movement of Liquid Metal Droplet in Channel by Continuous Electrowetting Effect,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 33, No. 3, pp. 217-223, 2016.
 20. Peng, C., Zhang, Z., Kim, C. J and Ju, Y. S., “EWOD (electrowetting on dielectric) digital microfluidics powered by finger actuation,” *Lab on a Chip*, Vol. 14, No. 6, pp. 1117-1122, 2014.