

## 표면 전하 유무에 따른 대전된 미소액적의 충돌 현상

이재현\* · 김지훈\*\* · 변도영\*

### The impact behaviors of electrified micro-droplet with existence and nonexistence of electrical charged for surface

Jaehyun Lee, Jihoon Kim and Doyoung Byun

**Abstract.** Recently, researches for droplet impact phenomena have been faced a new phase in the direction of studying the effect of complex external conditions (e.g. wettability, temperature, morphology, electric field, etc.) for depth understanding and precise controlling in various applications. Hence, here we investigated the electrified droplet impact phenomena, because there were few quantitative researches for electrified droplet impact when we considering many real applications such as electrospray, electrohydrodynamic (EHD) jet printing. To observe interaction effect of surface charge between substrate and droplet simultaneously, micro-droplets with various Reynolds number ( $Re$ ) and Weber number ( $We$ ) were dripped on super-hydrophobic surface with existence and nonexistence of electrical surface charge. It shows three kinds of impact behaviors, fully bouncing, partial bouncing, and splashing with different  $We$ . Also, charged droplet bounced higher on electrically charged surface than on non-charged surface. Additionally, transition regions of three impact behaviors were classified quantitatively with water hammer pressure value, which means instant pressure inside droplet at the impact moment.

**Key Words :** Droplet dynamics(액적 동역학), Droplet impact(액적 충돌), Superhydrophobic surface(초소수성 표면), Electrohydrodynamics(전기 수력학)

#### 1. 서론

유체와 고체가 직접 충돌하는 경우 다양한 현상이 발생된다. 특히 미소 액적 충돌에 관한 연구는 표면장력과 같은 액체의 특성과 기판의 습윤성에 의하여 나타나는 퍼짐, 수축, 점핑과 같은 일련의 물리적 현상에 대하여 진행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 이는 더 나아가 마이크로 추진 시스템, 스프레이 기법을 이용한 박막 코팅, 자가 세척, 응축 열전달, 빙결 방지 등에 응용되어 왔다. 최근에는 기판의 형상학적 특성, 온도, 그리고 동적 운동 환경 등에 따른 다양한 복합적 조건 하에서 유체의 흐름 해석 및 제어를 위한 방향으로 진

행되고 있다.<sup>(4-7)</sup> 몇 가지 예로 Nenad Miljkovic 등은 초소수성 표면에서의 응결 과정에서 액적의 합일(Coalescence)과 점핑에 대하여 관찰하였으며 표면의 습윤성에 의하여 응결 시 표면의 액적 제거가 가능함을 보였다.<sup>(8)</sup> Yeong 외는 Weber number와 Ohnesorge number를 이용하여 기판의 기울기에 따라 액적 충돌 후 나타나는 현상이 다양하게 나뉘는 것을 보였다.<sup>(9)</sup>

이러한 액적의 물리적인 거동을 해석하기 위해서는 잘 알려진 Reynolds number ( $Re$ ), Weber number ( $We$ ), 그리고 Ohnesorge numbers ( $Oh$ )와 같은 무차원 수가 정의된다. Reynolds number는 점성력에 대한 관성력의 비를 나

† Corresponding Author: Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 300, Cheonchoen-dong, Jangan-gu, Suwon, Gyeonggi-do, E-mail: dybyun@skku.edu

\* Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, E-mail: Emmettbread@gmail.com

\*\* Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST), E-mail: jihoonkim@kiost.ac

타내며, Weber number는 표면장력에 대한 관성력의 비, 그리고 Ohnesorge numbers 는 앞의 두 무차원 수를 결합한 표면 장력과 관성력에 대한 점성력의 비를 나타낸다. 특히 Weber number는 충돌 후 액적의 점핑을 유도하는 복원력을 이해하는데 가장 큰 영향을 미치는 요소이다.<sup>(10,11)</sup>

한편 응용분야의 한가지 예로, 전기력에 기반한 전기수력학 (electrohydrodynamic) 젯과 스프레이는 강한 접선방향의 전기 응력 (electrical tangential stress)에 의해 액적의 초미세 패터닝 또는 균일한 박막 코팅이 가능하며 Byun et al. 등에 의해 지속적으로 그 연구 결과가 보고되었다.<sup>(12-14)</sup> 하지만 그 응용 범위에 비해 전기력 하에서의 액적 충돌 및 그 2차 현상에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않았다. 관련된 선행 연구로는 Nenad Miljkovic 등이 파이프 외관의 응결된 액적들이 전기장 하에서 어떤 거동을 보이는지 정량적으로 분석했으나, 이는 대전된 전하량과 전기력의 세기에 따른 움직임 외에 실제 고체 표면에서의 충돌과 점핑 현상은 보고하지 않았다.<sup>(15)</sup> 따라서 본 연구에서는 대전된 액적이 기판에 충돌 시 표면의 전하 유무에 따른 점핑 현상을 이해하기 위하여 정적 접촉각이 150도 이상인 초소수성 기판 위에 다양한  $Re$  수와  $We$  수의 대전된 액적의 충돌을 실험적으로 관찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

초소수성 표면을 구현하기 위해 기존 문헌에 보고된 바와 같이 silane이 코팅된 ZnO 나노 입자를 PDMS 위에 도포시킴으로써 얻었다.<sup>(16)</sup> 사용된 Silane은 Aminopropyltriethoxysilane (APS)이며, 균일한 초소수성 표면 형성을 위해 50nm 이하 크기의 ZnO 파우더를 사용하였다. 노즐은 Stainless Capillary를 이용하였으며, 토출하는 액적 크기의 균일한 제어를 위해 Syringe Pump를 이용하였다. 기판과 노즐의 대전력은 테슬라 코일(Tesla Coil)을 이용하였으며, 표면 전하의 측정은 Static field meter (Model 19492, Desco Industries Inc.)를 이용하여 측정하였다.

실험 장치는 Fig 1과 같이 구성하였으며 초고속 카메라를 통해 측정된 이미지를 이용하여 액적의 직경, 충돌 속도, 최대 퍼짐 직경, 그리고 점핑 높이와 같은 변수를 구하였다.

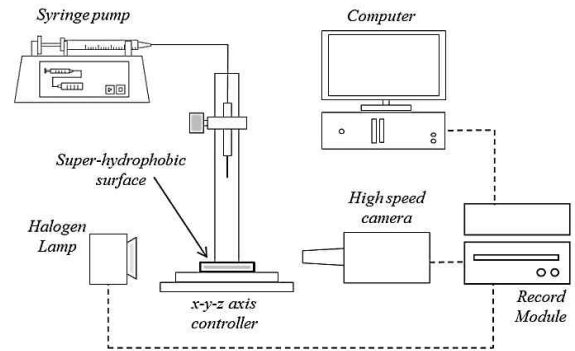


Fig. 1. Schematic of experimental setup for droplet impact

## 3. 결과 및 고찰

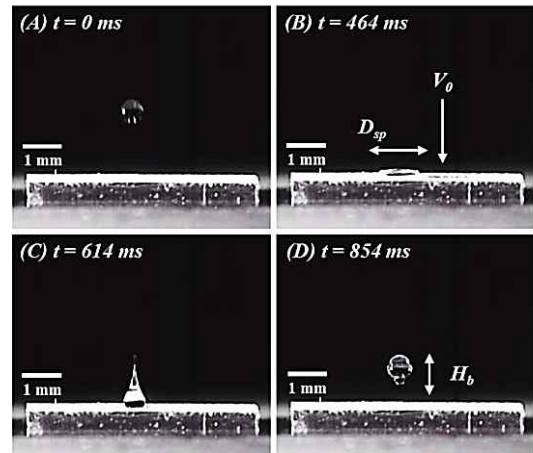


Fig. 2. A snapshot of droplet bouncing on the super-hydrophobic surface

Fig 2는 대전된 초소수성 표면에 충돌하는 액적의 일련의 과정을 시간 단계별로 나타낸 것이다. 액적이 충돌하면서 압축된 에너지는 점성력을 극복하는 표면장력에 의한 복원력으로 작용하여 다시 튀어오르게 된다. Fig 3은 액적의 크기와 기판의 대전 유무에 따라  $Re$  수 대비  $We$  수의 값을 나타낸 것이다. 대전된 기판의 경우 대전되지 않은 기판에 비해 상대적으로 충돌직진 속도가 미약하게 감소되는 것을 확인하였다.

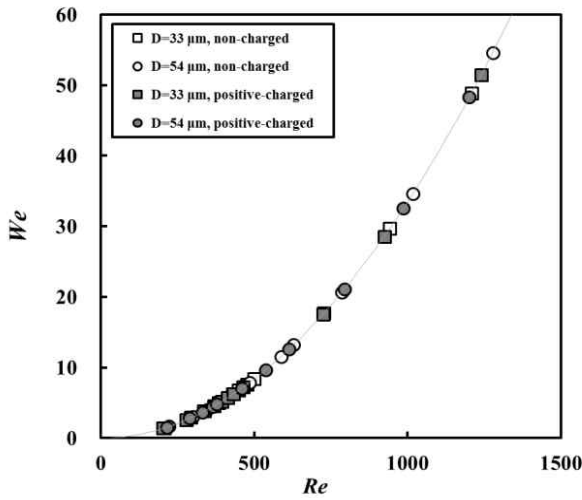


Fig. 3. Weber number distribution with Reynolds number of charged droplet on charged- and non-charged surface

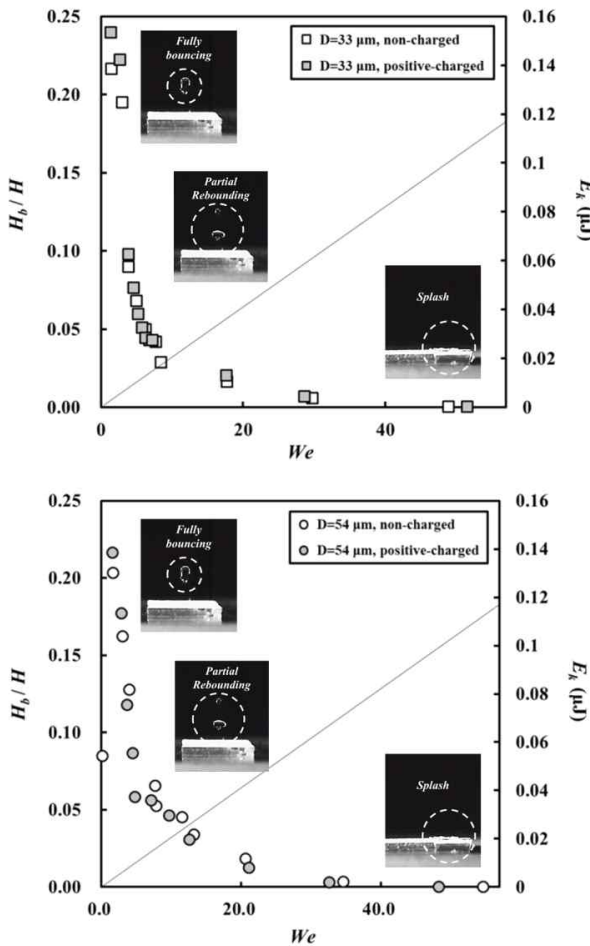


Fig. 4. Compressibility ratio of the droplet with Weber number (Upper; 33 $\mu\text{m}$  droplet, Down; 55 $\mu\text{m}$  droplet)

Fig 4는  $We$  수에 따라 충돌한 액적의 낙하 높이와 점핑 높이를 무차원화시켜 나타낸 그래프이다. 그래프 우측 향의  $E_k$  값은 충돌하는 액적의 Kinetic Energy 값이며, 이 Kinetic Energy Barrier를 기준으로 더 높은 범위에 있는 경우, Fully Bouncing과 Partial bouncing을 보였으며, 낮은 범위에 있는 구간은 Splash가 일어나며 Bouncing이 일어나지 않았다. 또한 33 $\mu\text{m}$ , 54 $\mu\text{m}$  직경을 가지는 두 액적 모두  $We$  수가 작은 구간에서는 기판이 같은 전하로 대전되었을 때 그렇지 않은 경우보다 더 높게 Bouncing 되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 기판의 표면 전하가 액적의 전하와 같을 때, 표면의 정전기력에 의한 반발력으로 표면장력과 함께 점성력이 좀 더 쉽게 극복될 수 있다고 판단되었다.

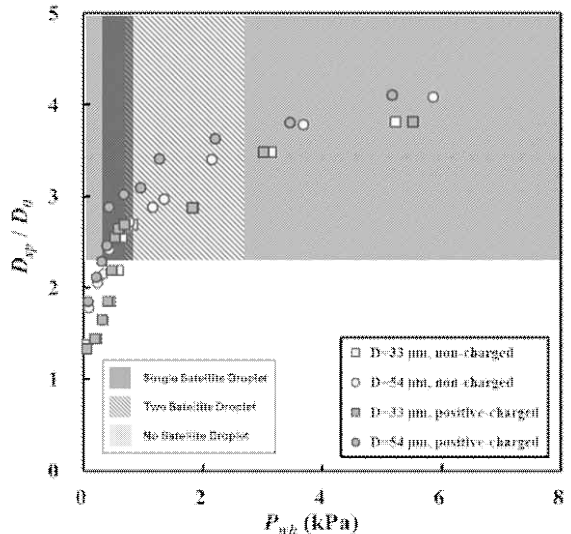


Fig. 5. Non-dimensional diameter of charged droplet by various water hammer pressures

Fig. 4와 같이 Kinetic Energy에 따라 bouncing 되는 구간이 존재함을 확인하였으며, 이를 좀 더 정성적으로 확인하기 위하여 기존 문헌에서 보고된 Water Hammer Pressure를 이용하여 기존 액적 직경 대비 피침 직경에 대한 무차원 직경을 Fig. 5와 같이 나타내었다.<sup>(17)</sup> Water Hammer Pressure ( $P_{WH}$ )란 Micro-Roughness가 있는 표면 위에서 액적이 충돌하는 순간 액적 내부에서 일어나는 Shockwave에 따른 충돌 압력을 의미하며, 다음과 같이 표현된다.

$$P_{WH} \approx 0.2 \rho CV$$

$\rho$  는 액적의 밀도,  $C$  는 액체 안에서의 음속,  $V$  는 충돌 속도를 나타낸다. Fig. 5를 통하여 Water Hammer pressure에 의해 Satellite Droplet 개수에 따른 일정 구간이 존재함을 확인하였으며, 기판이 대전된 경우에는 정전기력의 반발력에 의하여 퍼짐 직경이 약간 감소하는 경향을 보임을 다시 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대전된 액적이 표면 전하가 있는 기판에 충돌했을 때 어떤 전기력 상호작용이 있는지 알아보기 위하여 초소수성 표면을 이용한 액적 점핑 현상을 관찰하였다. 대전된 액적이 표면 전하가 존재하는 표면에 충돌하였을 때, 충돌 속도는 전기력 반발력에 의해 미소하게 감소하였다. 또한 표면 전하가 존재하지 않을 시에 퍼짐 직경이 감소하였지만, 전기력 반발력으로 인하여 표면장력과 함께 점성력을 충분히 극복할 수 있었고, 이는 더 높은 점핑 현상을 보임을 정성적 및 정량적으로 확인하였다. 따라서, 이와 함께 액적 표면 전하의 전기력에 의한 반발 효과 메커니즘 연구가 좀 더 정량적으로 시행된다면, 이미 상용화되어 있는 많은 전기수력학 응용 기술에서 나타나는 문제점들을 보완하고 좀 더 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단 도약연구지원사업(도전) 연구과제 (2010-0015754)의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### Reference

- 1) Rioboo R, Tropea C, and Marengo M., 2001, "Outcomes from a drop impact on solid surfaces", *At. Sprays*, Vol.11, pp.155-165
- 2) A.L. Yarin, 2006, "Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing...", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol.38, pp.159-192
- 3) C Y Lim and Y C Lam, 2014, "An investigation into a micro-sized droplet impinging on a surface with sharp wettability contrast", *J. Phys. D.: appl. Phys.*, Vol.47, pp.425305
- 4) James C. Bird, Rajeev Dhiman, Hyuk-Min Kwon, and Kripa K. Varanasi, 2013, "Reducing the contact time of a bouncing drop", *Nature*, Vol.503, pp.385-388
- 5) G. E. Cossali, M. Marengo, and M. Santini, 2005, "Secondary atomisation produced by single drop vertical impacts onto heated surfaces", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol.29, pp.937-946
- 6) V. Bertola, 2015, "An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces", *Int. J. Heat Mass Trans.*, Vol.85, pp.430-437
- 7) Isha Ghai, Johnson Samuel, Richard E. DeVor and Shiv G. Kapoor, 2013, "Analysis of Droplet Spreading on a Rotating Surface and the Prediction of Cooling and Lubrication Performance of an Atomization-Based Cutting Fluid System", *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol.135, pp.031003
- 8) Nenad Miljkovic, Ryan Enright, Youngsuk Nam, Ken Lopez, Nicholas Dou, Jean Sack, and Evelyn N. Wang, 2013, "Jumping-Droplet-Enhanced Condensation on Scalable Superhydrophobic Nanostructured Surfaces", *Nano Lett.*, Vol.13, pp.179-187
- 9) Yong Han Yeong, James Burton, Eric Loth, and Ilker S. Bayer, 2014, "Drop Impact and Rebound Dynamics on an Inclined Superhydrophobic Surface", *Lnamguir*, Vol.30, pp.12027-12038
- 10) Rioboo R, Marengo M, and Tropea C., 2002, "Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces", *Exp. Fluids*, Vol.33, pp.112-124
- 11) Sikalo S, Marengo M, Tropea C, and Ganic EN., 2002, "Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, Vol.25, pp.503-510
- 12) Vu Dat Nguyen and Doyoung Byun, 2009, "Mechanism of electrohydrodynamic printing based on ac voltage without a nozzle electrode", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.94, pp.173509
- 13) Baekhoon Seong, Ilkyeong Chae, Hyungdong Lee, Vu Dat Nguyen, and Doyoung Byun, 2015, "Spontaneous self-welding of silver nanowire networks", *Phys. Chem. Chem. Phys.*, Vol.17, pp.7629-7633

- 14) Hadi Teguh Yudistira, Vu Dat Nguyen, Prashanta Dutta, and Doyoung Byun, 2010, "Flight behavior of charged droplets in electrohydrodynamic inkjet printing", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 96, pp.023503
- 15) Nenad Miljkovic, Daniel J. Preston, Ryan Enright, and Evelyn N. Wang, 2013, "Electrostatic charging of jumping droplets", *Nature Commun.*, Vo.4, 2517
- 16) Bin-Bin Wang, Jiang-Tao Feng, Ya-Pu Zhao, and T. X. Yu, 2010, "Fabrication of Novel Superhydrophobic Surfaces and Water Droplet Bouncing Behavior — Part 1: Stable ZnO-PDMS Superhydrophobic Surface with Low Hysteresis Constructed Using ZnO Nanoparticles", *J. Adhes. Sci. Technol.*, Vol.24, pp.2693-2705
- 17) Tao Deng, Kripa K. Varanasi, Ming Hsu, Nitin Bhate, Chris Keimel, Judith Stein, and Margaret Blohm, 2009, "Nonwetting of impinging droplets on textured surfaces", *J. Appl. Phys. Lett.*, Vol. 94, pp.133109
- 18) Sung Uk Ryu and Sang Yong Lee, 2009, "Maximum spreading of electrically charged droplets impacting on dielectric substrates", *J. Multiphase Flow*, Vol.35, pp.1-7
- 19) Weiwei Deng and Alessandro Gomez, 2010, "The role of electric charge in microdroplets impacting on conducting surfaces", *Phys. Fluids*, Vol.22, pp. 051703
- 19) Sungchan Yun, Jiwoo Hong, and Kwan Hyoun Kang, 2013, "Suppressing drop rebound by electrically driven shape distortion", *Phys. Rev.*, Vol.87, pp.033010