

전극 표면 코팅 상태에 따른 액적 접촉 충전 거동 분석

김효찬 · 배서준 · 임도진[†]

국립부경대학교 화학공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
(2025년 6월 3일 접수, 2025년 8월 7일 수정본 접수, 2025년 8월 11일 채택)

Analysis of Droplet Contact Charging Behavior Depending on the Coating Condition of the Electrode Surface

Hyo Chan Kim, Seo Jun Bae and Do Jin Im[†]

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea
(Received 3 June 2025; Received in revised from 7 August 2025; Accepted 11 August 2025)

요 약

본 연구에서는 비전도성 매질 내에서 전도성 액적의 접촉 충전 현상에서 전극 표면의 소수성 코팅이 액적의 충전 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 동일한 실험장치에서 전극 코팅 종류를 변화시키고, 각 코팅 조건에서 액적의 크기와 전기장의 세기를 변화시켜 전하량의 변화를 분석하였다. 연마만을 진행한 전극에서의 실험을 대조군으로 설정하여 소수성 코팅으로 Teflon과 Thiol 코팅을 적용하여 액적 충전 실험을 진행하였다. Teflon 코팅 전극은 대조군 대비 접촉각이 약 10° 증가하였으나 충전 성능이 90% 수준을 보였으며 충전량의 편차도 더 크게 나타났다. 이에 반해 Thiol 코팅 전극은 접촉각이 약 21° 증가하여 가장 높은 소수성 특성을 나타냈으나 양극에서의 전하 충전이 거의 일어나지 않는, 기존 액적 접촉 충전 현상에서 보고된 적 없는 특이한 현상이 발견되었다. Thiol 코팅이 보이는 특이한 충전 거동은 Thiol 코팅의 강한 표면 전하에 기인한 것으로 추정되나 추후 추가적인 연구를 통한 확인이 필요할 것으로 판단된다. 실험결과를 토대로 ECD 실험에 사용되는 전극 표면에 소수성 코팅을 진행해야 할 경우, Teflon 코팅을 적용하는 것은 가능하나 Thiol 코팅의 경우, 우수한 소수성 특성에도 불구하고 접촉 충전 거동 및 충전량의 급격한 변화로 전극의 소수성 코팅으로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

Abstract – In this study, the effect of hydrophobic coating of electrode surface on the charging behavior of droplets in the contact charging phenomenon of conductive droplets in a non-conductive medium was analyzed. In the same experimental device, the type of electrode coating was changed, and the change in charge amount was analyzed by changing the size of the droplet and the intensity of the electric field under each coating condition. The experiment on the electrode that was only polished was set as the control group, and the droplet charging experiment was conducted by applying Teflon and Thiol coatings as hydrophobic coatings. The Teflon-coated electrode showed an increase in the contact angle of about 10° compared to the control group, but the charging performance was at the level of 90%, and the deviation of the charging amount was also larger. In contrast, the thiol-coated electrode showed the highest hydrophobic characteristics with a contact angle increase of approximately 21°, but a peculiar phenomenon that has not been reported in the existing droplet contact charging phenomenon was found, in which almost no charging occurred at the anode. The peculiar charging behavior exhibited by the thiol coating is presumed to be due to the strong surface charge of the thiol coating, but confirmation through additional research is necessary in the future. Based on the experimental results, if a hydrophobic coating is to be applied to the electrode surface used in the ECD experiment, it is possible to apply a Teflon coating. However, in the case of a thiol coating, although the hydrophobic properties are very excellent, it is not suitable as a hydrophobic coating for the electrode due to the rapid change in contact charging behavior and charging amount.

Key words: Droplet, Contact charging, Coating, Electrode surface

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dj-im@pknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<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.

1. 서 론

액적 접촉 충전(Electrophoresis of Charged Droplet, ECD)현상 [1-3] 기반의 액적 제어 기술은 개별 액적을 전기적으로 제어하는 디지털 미세유체 기술의[4] 하나로, 기존 채널 내 액적을 다루는 액적 미세유체(Droplet Microfluidics)[5-7] 기술과 구별된다. 이 기술은 비전도성 매질 속 전도성 액적이 고전압(약 2~4 kV/cm) 전극과 직접 접촉하여 충전과 방전을 반복하는 전기수력학적 현상을 이용한다. 액적은 전극과 접촉하는 순간, 접촉 전극과 같은 극성의 전하를 얻고, 척력이 생기게 되어 반대편 전극으로 밀려나 이동한다. 이 과정에서 액적이 전극을 반복적으로 접촉, 이동하면서 전하를 방출하고 다시 획득하는 과정은 별도의 펌프나 기계적 장치 없이 전기장만으로 액적의 움직임이 가능하며 전기장의 세기와 액적의 크기 및 성분, 비전도성 매질의 점도를 조절하여 액적의 움직임 제어가 가능하다는 특징이 있다.

ECD는 위와 같은 특징으로 다양한 분야에서 독창적인 연구 주제로 활용되고 있다. 고전적인 주제로, 빗방울 사이의 병합과 분리 현상에 전기장 하에서의 빗방울 액적의 움직임을 해석하는데 활용되었으며[8], 서로 다른 전하를 띠는 두 물방울의 비 병합 문제 해석에도 ECD 현상이 활용되었다[9]. 전기 프린팅(Electrohydrodynamic, EHD) 시스템에서 전하를 띤 프린팅 액적의 움직임과 제어를 위한 연구가 진행되었으며[10,11] 해양 시추된 원유 내 물을 제거하는 공정의 설계와 해석에도 활용되었다[12,13]. 최근에는 세포에 유전 물질을 전달하는 전기전공 연구와[14,15] 액적 내 세포를 배양하고 스페로이드를 형성하는 연구[16-18] 등 생물학 분야의 연구로도 연구 영역이 확장되고 있다.

ECD 현상은 비교적 최근에 발견되었으며, 2000년대 중반까지는 기본적인 원리나 가설이 정립되지 않아 개별 연구가 단편적으로 진행되었다[19]. 이후 연구자들이 전하 측정 실험 장치와 방법을 개발하면서 체계적인 분석이 이루어졌다[20-22]. ECD 기술은 간단하고 정확한 원리로 전극 설계와 액적의 이동속도 예측이 용이하지만 액적의 크기가 작고 고전압을 사용해야 하므로 전기적, 유체역학적 영향을 크게 받으며, 특정 조건에서는 제어가 어려울 수 있다. 특히 전극면과 액적이 반복적으로 접촉하는 과정에서 금속 전극의 표면이 산화되거나 오염될 가능성이 있으며 액적의 접촉각이 변하는 습윤(Wetting) 현상이 발생할 수도 있고 이는 전기 전도성과 액적의 전하 접촉 충전량 감소로 이어질 수 있다. 이를 방지하기 위해 전극 표면에 소수성 코팅을 적용하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 소수성 코팅은 전극의 오염과 부식을 방지하며 습윤 현상을 줄일 수 있는 점을 기대할 수 있지만 코팅 방식과 환경에 따라 접촉 충전 성능 저하가 발생할 수 있다. 하지만 아직까지 전극 코팅에 따른 접촉 충전량의 변화 등 ECD 특성 변화 관련 연구는 전무한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 전극 표면 코팅 상태가 ECD 현상 하의 액적의 충전 거동에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 확인하고자 한다. 서로 다른 소수성 코팅제를 (Teflon과 Thiol) 이용해 코팅 방식에 따른 액적의 충전량을 비교하였으며 액적 크기와 전기장의 세기를 변화시키며 충전량을 분석하였다. 정확한 비교를 위해 표면 연마만을 진행한 전극을 대조군으로 설정하여 Teflon과 Thiol 코팅제를 적용한 전극과 비교 실험을 진행하였다. 코팅 전후의 액적 접촉 충전량을 액적의 속도를 측정하여 비교하였으며 이를 통해 전극 표면 코팅 상태에 따라 액적 접촉 충전 거동을 분석하였다. 얻어진

결과를 바탕으로 디지털 미세유체 ECD 칩에 적용 가능한 소수성 코팅 방법을 제안하였다. 마지막으로 실험 중 이전 연구에서 관찰하지 못했던 새로운 현상에 대해 논의하였으며 해당 현상에 대한 추가적인 연구 계획에 대해 제안하였다.

2. 실험

2-1. 실험 장치

전극 코팅 상태에 따른 액적의 접촉 충전 거동 비교 실험에 사용된 장치의 구조는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같다. 실험에서 전극은 구리 판 전극(폭 1 cm × 높이 4 cm)을 사용하였다. Cuvette 상단에는 전극을 고정하고 액적을 주입할 수 있도록 아크릴 구조물을 배치하였으며, 중앙에 직경 3 mm의 구멍을 두어 마이크로 파이펫을 이용해 cuvette 내부로 액적을 주입할 수 있도록 하였다. Cuvette 내부에는 비전도성 매질인 실리콘 오일(Shin-Etsu KF-96)을 채웠다. 접촉 충전 실험을 수행하는 장치는 Fig. 1(a) 우측에 나타난 모습과 같이 전극 간 거리가 약 9 mm인 평행한 두 전극 쌍을 구성하여 제작하였다. 양쪽 전극은 두 개의 고압 전원공급장치(Keithley 248 high voltage supply)를 사용하여 좌측 전극에는 전원공급장치의 음극을, 우측 전극에는 다른 전원공급장치의 양극을 연결하여 2~3 kV/cm 사이의 전기장을 인가하였다. 액적의 움직임을 확인하기 위해 디지털카메라(Cannon EOS 100D)와 LED 조명을 cuvette을 중앙에 두고 역광으로 배치하였다. 액적이 왕복 운동하는 움직임을 동영상으로 촬영하였으며 카메라 제어와 파일 저장을 위해 노트북을 카메라에 연결

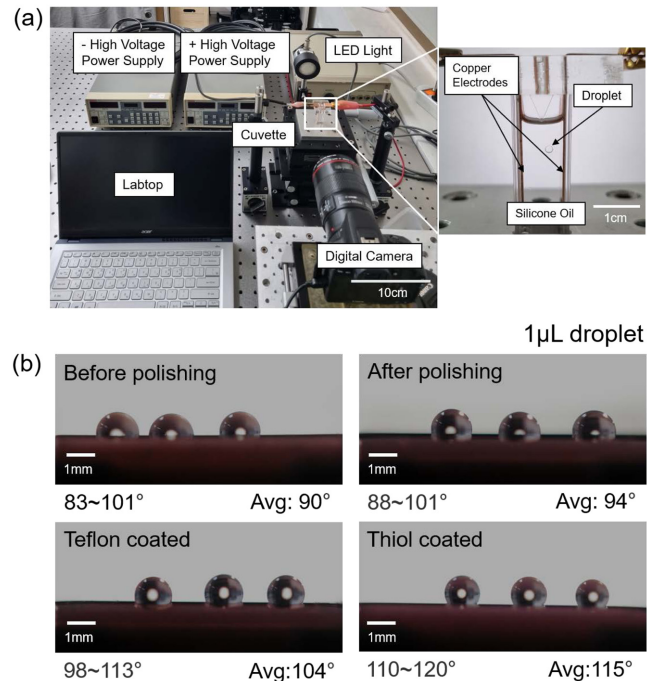


Fig. 1. (a) Experimental setup of the ECD system, (b) Comparison of contact angles of 1 μL water droplets on copper electrode with different surface treatments. Before-polishing electrode remained untreated, the average contact angle was 90 ± 6.6°. After-polishing, Teflon-coated and Thiol-coated electrode were all polished. The contact angle of the After-polishing, Teflon-coated, and Thiol-coated electrode was 94 ± 5.5°, 104 ± 5.5°, and 115 ± 3.5°, respectively.

하여 사용하였다. 소수성 코팅 방식과 코팅 여부에 따른 접촉각 변화를 확인하기 위해 Fig. 1(b)와 같이 실험 셋업을 구성하였다. 구리 전극을 고정하기 위해 3D프린터를 이용해 지지체를 제작하여 지지체 위에 구리 전극을 올려 놓고 실험을 진행하였다. 고정된 전극 위에 마이크로 파이펫을 사용하여 1 μL 크기의 물방울을 올린 후, 물방울을 촬영하였다. 물방울의 윤곽을 선명하게 얻기 위해 디지털카메라(Cannon EOS 100D)와 LED 조명을 앞에서와 같이 구리판을 중앙에 두고 역광으로 배치하여 사진을 촬영하였다.

2-2. 실험 재료

전극 표면 코팅 상태에 따른 액적의 접촉 충전 실험 진행을 위해 cuvette 내부에는 비전도성 매질을 채웠다. 본 실험에 사용된 비전도성 매질은 전극의 부식을 막고 액적이 중력에 의해 수직으로 하강하는 속도를 조절하여 실험의 정보를 충분히 얻기 위해 실리콘 오일(Shin-Etsu KF-96)을 사용하였으며 사용된 오일은 동점도가 100 cSt, 밀도는 970 kg/m^3 , 전기 전도도는 6.87×10^{-14} S/m이다. 액체 액적으로는 물을 사용하였으며 순수 제조 장치(Green RO 350)를 통해 순수를 생산하여 사용하였고 순도는 1~30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다. 구리판 전극의 균일한 코팅을 위한 표면 연마를 진행하기 위해 시편 연마기(NA-P2001-Kobeto)와 사포를 (입자 크기는 400, 1000 grit) 사용하였다. 또한 전극의 추가 연마를 위해 차량용 소프트 컴 파운드를 사용하여 추가 연마를 진행하였다. 전극의 소수성 처리를 위해 Teflon 코팅은 코팅 용액으로 Fluoropel 800 1%(CYTONIX)를 사용하였으며 Thiol 코팅은 산화 용액으로 NaOH와 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 혼합액을 사용하였고 코팅 용액으로 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecanethiol (Sigma-Aldrich)을 사용하였다.

2-3. 실험방법

실험에 앞서, 연마를 진행한 전극에 코팅을 하기 위해 코팅 성분에 따른 서로 다른 코팅 방법을 적용하여 각 실험 조건 별 전극을 준비

하였다. Teflon 코팅은 딥코팅 방법으로 코팅하였으며 코팅 방법은 다음과 같다. Fluoropel 800 1% 시약을 입구가 넓은 용기에 담은 후 약 30초 뒤 전극을 일정한 속도로 천천히 꺼내어 코팅을 형성시키고 오븐에 넣어(100°C) 약 1시간 동안 건조했다. Thiol 코팅은 NaOH와 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ 혼합액으로 전극을 먼저 산화시킨 후 1H, 1H, 2H, 2H-perfluorodecanethiol을 사용해 Teflon 코팅과정과 유사한 딥코팅 방식으로 코팅을 진행하였다.

액적의 접촉 충전 실험 과정은 다음과 같다. 준비된 cuvette에 실리콘 오일을 채운 후, 전극 쌍을 cuvette 상단의 아크릴 구조물에 끼워서 cuvette에 삽입하였다. 이후, 전극 쌍을 고압 전원공급장치의 양극과 음극에 각각 연결한 뒤, 전원을 가동하여 두 전극 사이에 2~3 kV/cm의 높은 전기장을 생성시켰다. 이 상태를 약 10분간 유지하여 시스템이 전기적인 평형 상태에 도달하도록 하였다. 평형 상태가 형성된 후, 마이크로 파이펫을 이용해 0.1~3 μL 부피의 순수를 cuvette 내부에 주입하여 액적이 두 전극 사이에서 왕복 운동을 하게 하였다. 이때, 액적의 움직임을 카메라로 촬영하고 동영상을 저장하였다.

전극 조건에 따른 액적의 충전 거동을 분석하기 위해 액적의 위치와 속도 정보를 동영상에서 프레임별로 추출한 사진을 이용하였다. Fig. 2(a)는 저장된 동영상에서 (1920×1088 pixels, 25 fps) Python 프로그래밍을 활용하여 프레임 단위로 추출한 원본 사진이다. 동영상은 25프레임으로 사진 1장당 1/25초의 정보를 가지고 있으므로 시간에 따른 액적의 위치 정보를 추적하여 속도를 계산할 수 있다. 동영상에서 추출한 사진은 Fig. 2(b)와 같이 이진화 파일로 바꿔 액적의 둘레와 중심위치를 프로그래밍 상에서 탐지하였다. 탐지한 액적의 정보를 바탕으로 위치와 크기를 특정하였고 이는 Fig. 2(c,d)에서 확인할 수 있다. 액적의 중심위치 정보를 각 프레임별로 정리, 비교함으로써 액적의 수평, 수직 방향으로의 이동 속도를 추정하였다. 이렇게 추정된 액적의 속도와 Stokes law를 이용하여 각 전기장 및 액적 크기 조건에서의 액적의 전하량을 추정하였다.

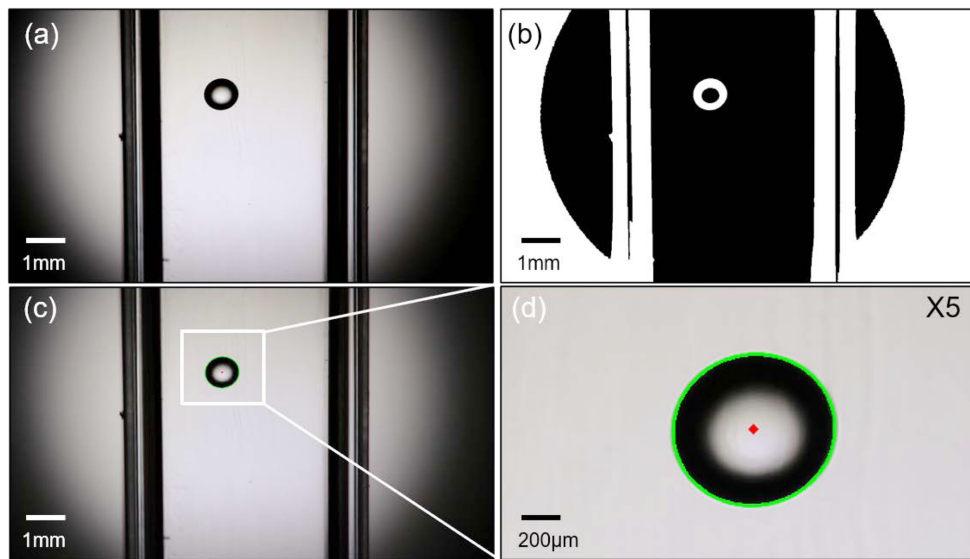


Fig. 2. Analysis of droplet videos of the ECD system using a Python program. The droplet size ranges from 0.1 to 3 μL . A 1 μL droplet is shown in all images. The estimated velocity includes both horizontal and vertical components, where the horizontal velocity corresponds to the movement driven by the electric force. (a) The extracted image of droplet from video frames. (b) Binary image conversion for droplet position tracking. (c) Detecting the position and size of the tracked droplet. (d) 5x magnified view of (c) the center detected droplet is indicated by a red dot, the surface is outlined in green.

소수성 코팅 여부에 따른 접촉각 변화 측정 실험은 전극 연마 전, 후 및 Teflon 코팅, Thiol 코팅 순서로, 처리한 전극 위에 1 μL 크기의 물방울을 올린 후 카메라로 촬영하여 진행하였다. 각각 다르게 처리된 전극 접촉면을 수평으로 위치시키고 가로 일렬로 3개의 물방울을 올리고 좌, 우 접촉면의 접촉각을 이미지 처리 프로그램 (Image J)을 이용해 측정하여 평균값을 구하였다. 측정된 평균 접촉각은 전극의 연마 전보다 연마후에 증가하였으며 소수성 코팅인 Teflon 코팅과 Thiol 코팅 방식으로 처리하였을 때의 접촉각이 추가적으로 더 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 전극 코팅 조건별 액적 접촉 충전 거동 분석을 위한 대조군 실험

전극 코팅 처리 전 구리 전극을 대조군(Control group)으로 설정하여 실험을 진행하였다. 사용한 전극은 연마만 한 상태의 전극으로 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 접촉각 평균이 94°이고 코팅 처리한 다른 전극에 비해 낮은 접촉각을 보였다. 전기장의 세기는 2, 2.5, 3 kV/cm 로 설정하였고 각 전기장 조건에서 0.1, 0.5, 1, 2, 3 μL 의 총 다섯가지 크기의 액적을 사용하여 충전 결과를 얻었다. 액적 속도의 부호는 음극에서 양극으로 이동하는 방향을 양의 속도로 정의하였다.

Fig. 3은 2.5 kV/cm 에서 0.1 μL 크기 액적의 실험값이다. Fig. 3a는 시간에 따른 액적의 속도 변화를 나타내며 이전 연구에서 보고된 결과와 마찬가지로, 일정한 양과 음의 속도가 교차되며 매우 일관성 있는 일정한 움직임을 보였다. Fig. 3(b)는 액적의 위치에 따른 속도 변화를 나타내며 이 역시 이전 연구와 마찬가지로, 중심에서 속도가 가장 빠르고 벽에 가까워질수록 Wall Effect로 인해 저항이 생겨 속도가 느려 지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)는 측정된 모든 접촉 충전 데이터의 무차원 전하량을 나타낸 것으로 전기장의 세기를 기준으로 나누었으며 동일 전기장 조건에서는 우측으로 갈수록 큰 액적의 데이터를 나타낸다. 전기장의 세기가 클수록, 동일한 전기장에서는 액적의 크기가 작을수록 무차원 전하량이 크게 나타났으며 이러한 경향은 이전 연구 결과와 일치하는 경향이다[1,20,23]. 특히 액적의 크기가 커짐에 따라 무차원 전하량이 감소되는 경향은 큰 액적일수록 벽면 저항의 영향이 커져 전하량이 감소하는 것 같은 효과가 나타나는 것으로 절대적인 전하량의 감소는 아니다[23]. Fig. 3d는 액적의 전하량을 액적 크기와 전기장 세기에 따른 스케일링 법칙으로 나타낸 결과이다. 액적의 전하량(Q)이 액적의 표면적과 전기장의 세기에 비례한다는 것을 다시한번 확인할 수 있었다. 스케일링 지수가 반지름 'a'의 2승보다 작은 1.9승이 되는 이유는 앞서 설명된 액적 크기가 커짐에 따라 벽면 저항으로 전하량이 작게 추정되는 이유 때문인 것으로 판단된다.

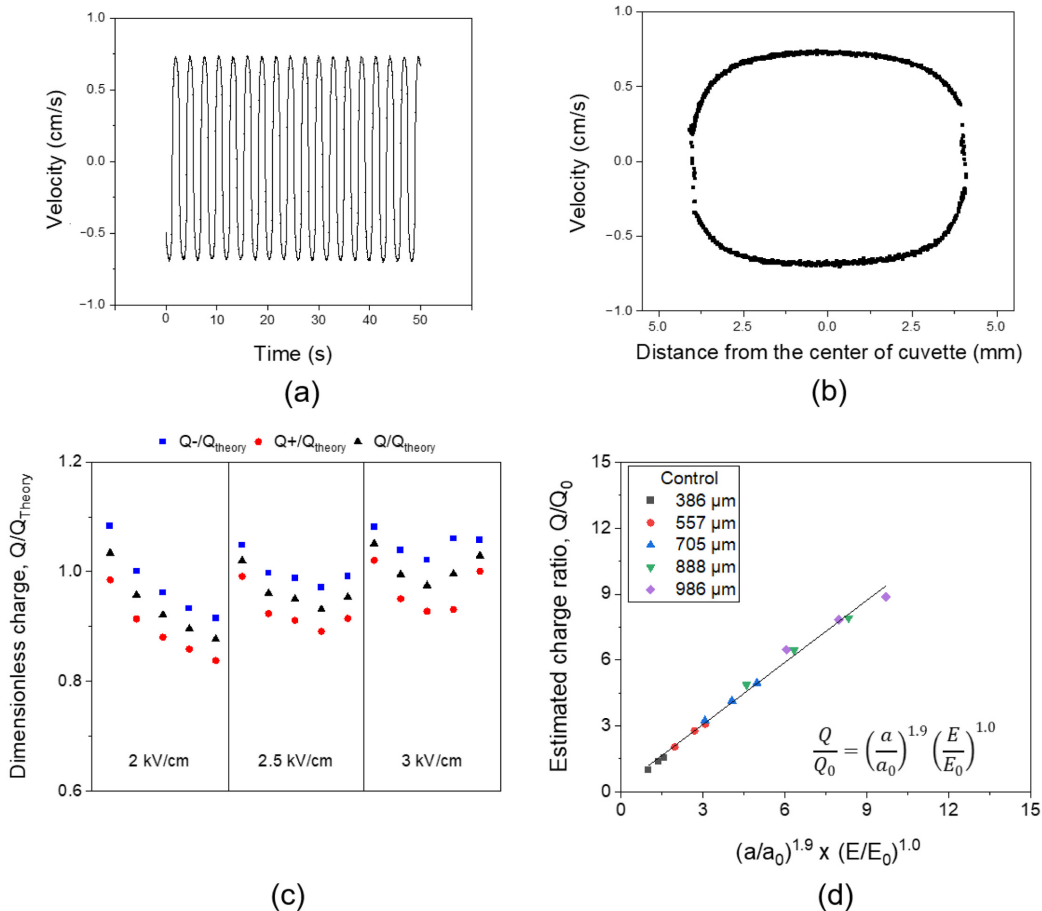


Fig. 3. Result of ECD experiment under the control electrode condition. (a) Velocity distribution of a 0.1 μL water droplet over time. (b) Velocity distribution of 0.1 μL water droplet. Droplets move left to right at positive velocities and right to left at negative velocities. (c) Dimensionless charge of various-sized (0.1–3 μL) droplets under different electric fields. (d) Scaling law describing water droplet charging. The reference state was set as $a_0=377 \mu\text{m}$, $E_0=2 \text{ kV/cm}$, $Q_0=1.48 \times 10^{-11} \text{ C}$. For the linear plot, $R^2=0.934$.

3-2. Teflon 코팅 적용에 따른 충전 거동 분석

Teflon 코팅을 적용한 후 접촉각 평균은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 평균 104°로 코팅 전과 비교하여 약 10°가 증가하였으며 이를 통해 Teflon 코팅이 소수성 코팅으로 구리 표면에 잘 적용된 것을 확인하였다. 대조군과 마찬가지로 세 개의 서로 다른 전기장의 세기와 각 전기장 세기에서 서로 다른 다섯 가지 크기 액적의 접촉 충전 실험을 진행하였다. 일정한 속도로 규칙적인 왕복운동을 보이던 대조군과 달리, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이, 액적은 시간에 따라 불규칙적인 속도 변화가 나타났으며 전체적인 평균 속도 또한 감소한 것으로 나타났다. 이러한 불규칙적인 충전 양상은 구리 표면의 코팅 상태가 균일하지 않은 것이 한 원인인 것으로 추정된다. Fig. 4b에서 위치에 따른 액적의 속도를 확인 한 결과는 앞선 불규칙적인 거동을 보다 잘 나타낸다. 특히, 전극에서 충전 후 반대편 전극으로 이동하면서 가장 큰 속도를 띄어야 하는 중심부에서도 많은 편차와 변화를 보이는 것으로 보아 Teflon 코팅으로 인해 충전되는 전하가 감소한 영향이 있다는 것을 보다 명확히 확인할 수 있다. Figure 4(c)에서는 Teflon 코팅에서의 모든 실험 데이터를 비교하였다. 액적의 크기가 커짐에 따라 무차원 전하량이 감소되었던 대조군과 달리 전반적으로 액적 크기 증가에 따라 평균 전하량이 증가하는 경향을 보였으며 특히 3 kV/cm 조건에서는 증가 경향이 매우

뚜렷해지는 등 대조군과는 다른 특징을 보였다. 가장 작은 0.1 μL 액적은 상대적으로 평균 충전량이 매우 낮게 측정되었으며 이는 코팅이 두껍게 형성되어 충분한 충전을 할 수 없는 상황에서 작은 크기의 액적은 표면의 변형이 상대적으로 어려워 충분한 충전량을 얻기 전에 반대편 전극으로 밀려나는 것이 한 원인으로 판단된다. 이러한 특성은 이전 연구에서 표면의 변형이 전혀 일어날 수 없는 glassy carbon 입자가 상대적으로 덜 충전되었던 현상과[24] 같은 맥락에서 이해할 수 있다. Fig. 4(d)는 액적의 전하량에 대한 스케일링 법칙을 나타낸 결과이다. 대조군과 달리 스케일링 지수가 반지름 ‘a’의 2승보다 큰 2.1승이 되어 표면적의 영향이 더 크게 나타났으며 이는 작은 액적에서 충전이 잘 되지 못하는 특성이 반영된 것으로 판단된다.

3-3. Thiol 코팅 적용에 따른 충전 거동 분석

Thiol 코팅은 코팅 전과 접촉각 비교를 하였을 때 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 평균 115°로 가장 큰 접촉각을 보였으며 이는 코팅 전보다 약 21° 높은 것으로 Teflon 대비 더 뛰어난 소수성 특성을 보였다. 앞선 실험들과 마찬가지로 세 개의 서로 다른 전기장의 세기와 각 전기장 세기에서 서로 다른 다섯 가지 크기 액적의 접촉 충전 실험을 진행하였다. Thiol 코팅의 경우 앞선 두 액적의 충전거동

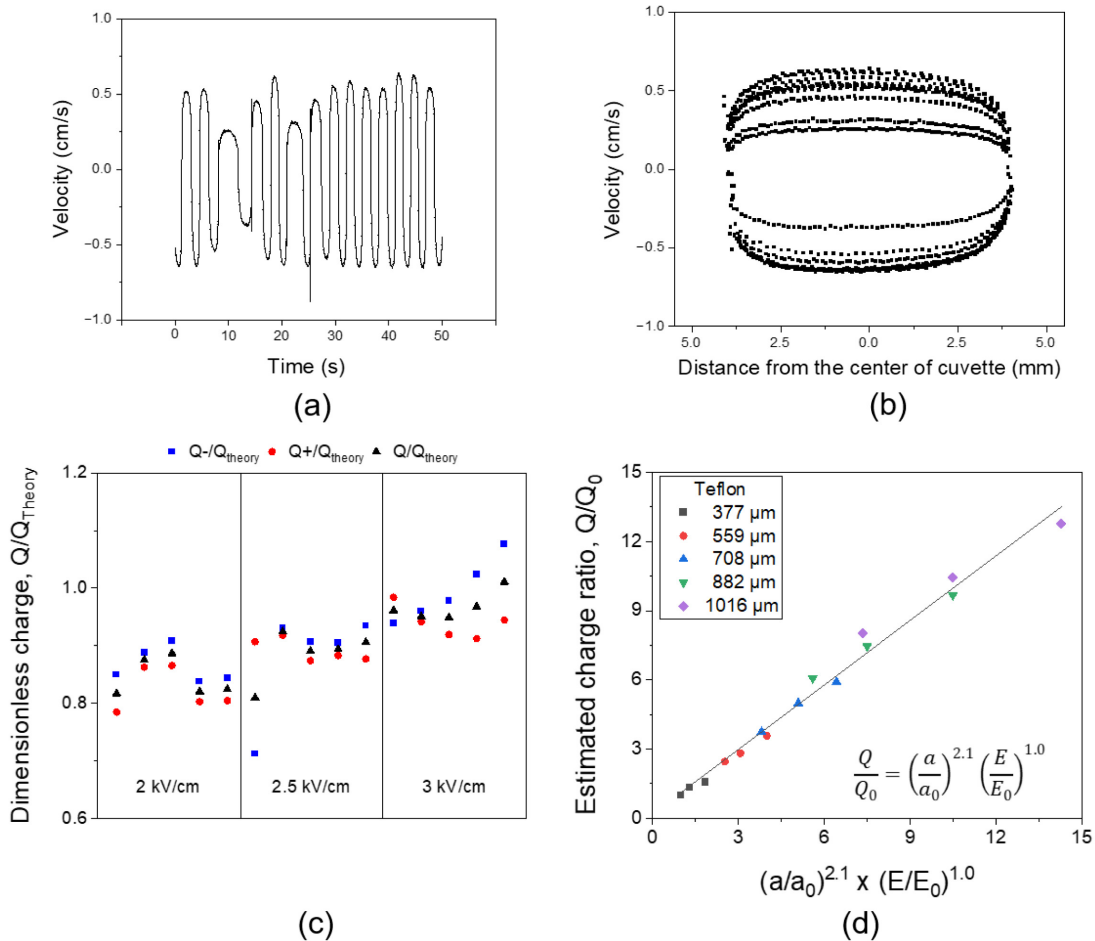


Fig. 4. Result of ECD experiment under the Teflon coated electrode condition. (a) Velocity distribution of a 0.1 μL water droplet over time. (b) Velocity distribution of 0.1 μL water droplet. Droplets move left to right at positive velocities and right to left at negative velocities. (c) Dimensionless charge of various-sized (0.1~3 μL) droplets under different electric fields (d) Scaling law describing water droplet charging. The reference state was set as $a_0=371 \mu\text{m}$, $E_0=2 \text{ kV/cm}$, $Q_0=1.13 \times 10^{-11} \text{ C}$. For the linear plot, $R^2=0.907$.

과는 매우 다른 양상을 나타냈으며 특히 양극에서 충전이 거의 일어나지 않아 음의 방향 속도가 매우 작게 나타나는 특징을 보였다. Fig. 5(a)는 0.1 μL 액적의 시간에 따른 속도 분포 변화가 나타나 있으며 앞선 결과들과 매우 다른 양상이 나타남을 확인할 수 있다. 양극에서 충전이 거의 일어나지 않아서 음극에서 출발한 액적의 속도 대비 약 5배 이상 느린 속도를 보였으며 이러한 경향은 Fig. 5(b)에서 보다 명확히 확인할 수 있다. 특히, 음극에서 양극으로 이동하는 액적의 경우, 최대 속도가 중심이 아닌 전극 주변 영역에서 나타나고 양극으로 이동하면서 지속적으로 속도가 감소하는 매우 특이한 속도 분포를 보였다. 이는 양극과 음극에서의 전기장 분포가 인가해준 균일한 상태의 전기장이 아니라 표면 전하에 의해 인가해준 전기장의 분포가 매우 크게 왜곡되었기 때문으로 추정해 볼 수 있다. 즉, Thiol 코팅의 표면 전하가 기존 평판 전기장의 분포를 매우 크게 왜곡해서 충전량과 충전 후 액적의 거동에 큰 영향을 미치는, 이전에는 관찰하지 못했던 매우 흥미로운 결과로 판단된다. Fig. 5(c)은 Thiol 코팅에서의 모든 실험 데이터를 나타낸다. 음극에서 충전된 전하량이 전기장 세기와 액적 크기가 증가함에 따라 증가하는데 반해 양극에서 충전된 전하량은 주어진 조건에 상관없이 이론적인 전하량 값의 약 20% 수준이 유지되는 매우 독특한 특성을 보였다.

이런 매우 특이한 충전 거동에도 불구하고 스케일링 법칙을 적용한 Fig. 5(d) 결과는 Teflon 코팅의 결과와 크게 다르지 않은 경향을 나타냈다. Thiol 코팅에 따른 이러한 특이한 충전 거동 양상은 추후 추가적인 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

3-4. 전극 코팅 전후 충전 거동 비교

전극 표면 코팅에 따른 액적 접촉 충전 거동 비교를 위해 앞서 측정된 무차원 전하량을 Fig. 6에 하나의 그래프로 정리하였다. 대조군인 연마만을 진행한 실험의 경우, 평균적인 무차원 전하량이 이론치에 근접한 결과를 나타내는데 반해 코팅을 한 전극의 경우, 무차원 전하량이 이론 값 대비 낮게 나타남을 비교를 통해 보다 명확히 확인할 수 있다. 특히 Thiol 코팅의 경우 평균적인 무차원 전하량이 이론치의 절반도 되지 않는 매우 작은 값을 가지는 것이 확인되며 특히 양극에서의 충전량이 매우 적은 것이 낮은 전하량을 가지는 가장 큰 원인인 것이 확인된다. Teflon 코팅의 경우, 0.1 μL 액적의 충전량이 다른 조건의 데이터 대비 유독 매우 낮게 측정되는 것으로 나타나는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이, glassy carbon 입자가 상대적으로 덜 충전되었던 현상과 유사하게, 코팅이 두껍게 형성되어 충분한 충전을 할 수 없는 상황에서 작은 크기의 액적은 표면의

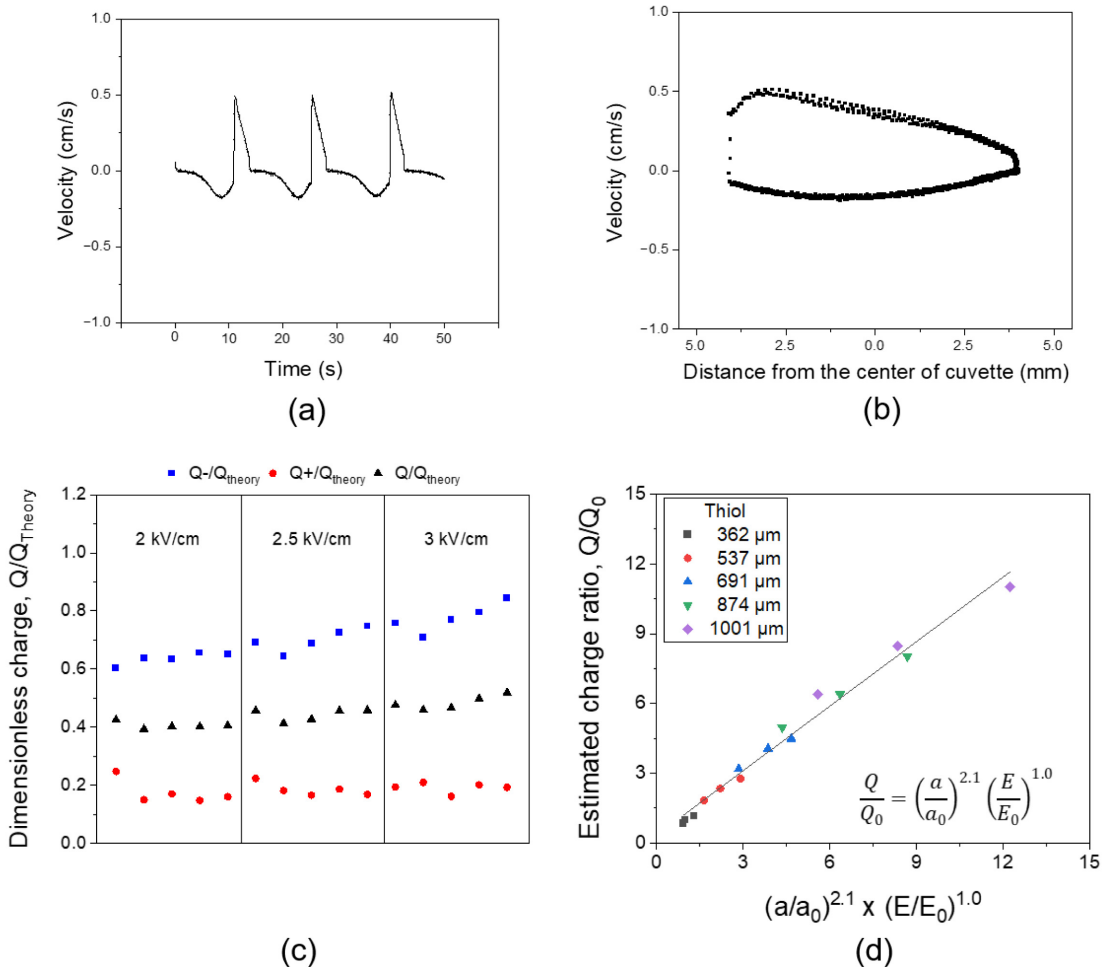


Fig. 5. Result of ECD experiment under the Thiol coated electrode condition. (a) Velocity distribution of a 0.1 μL water droplet over time. (b) Velocity distribution of 0.1 μL water droplet. Droplets move left to right at positive velocities and right to left at negative velocities. (c) Dimensionless charge of various-sized (0.1–3 mL) droplets under different electric fields (d) Scaling law describing water droplet charging. The reference state was set as $a_0=401 \mu\text{m}$, $E_0=2 \text{ kV/cm}$, $Q_0=6.87 \times 10^{-12} \text{ C}$. For the linear plot, $R^2=0.926$.

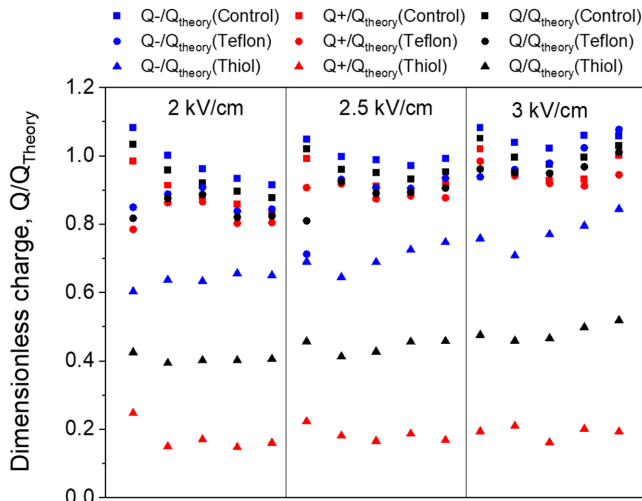


Fig. 6. Comprehensive experimental dimensionless charges of various-sized (0.1~3 μL) droplets under different electric fields with different electrode coating conditions. For the same electric field condition, the droplet size increase from left to right.

변형이 상대적으로 어려워 충분한 충전량을 얻기 전에 반대편 전극으로 밀려나는 것이 한 원인으로 판단된다. 이에 반해 높은 전기장인 3 kV/cm 조건에서 앞선 조건들과 달리 0.1 μL 액적의 충전량이 비교적 높게 나타나는 것은 강한 전기장으로 인한 표면 변형을 통해 보다 높은 충전량을 얻은 것으로 이해된다. Teflon 코팅의 경우, 평균적으로 대조군 대비 약 90% 정도의 충전량을 보이는 것으로 나타났으며 전기장의 세기가 낮을수록, 액적의 크기가 작을수록 측정된 전하량의 편차가 크게 나타났다. 이러한 경향 역시 앞선 추론과 설명을 뒷받침하는 결과로 판단된다. Teflon 코팅의 충전량 편차의 원인은 주로 불균일한 코팅이 원인인 것으로 판단되며 상대적으로 코팅이 두껍게 이루어진 부분에서 충분한 충전이 이루어지기 전에 충전 후 반발력에 의해 전극에서 떨어지며 평균 충전량 감소가 나타난 것으로 판단된다. 따라서 충전량 편차와 평균 충전량 감소를 줄이기 위해서는 스핀 코팅 등 보다 균일하고 얇은 박막의 코팅 방법 적용이 필요할 것으로 판단된다.

Thiol 코팅의 매우 낮은 충전 특성은 이전 연구에서는 보고된 적이 없는 매우 이례적이고 독특한 결과이다. 특히, 양극에서의 충전 거동은 액적의 크기나 전기장의 세기와 상관없이 거의 일정한 값을 나타내는데 반해, 음극에서의 충전량은 액적이 클수록, 전기장이 강할수록 높게 나타났다. 이러한 독특한 충전 특성은 Thiol 코팅에 의한 표면 전하의 영향으로 추정되나 보다 명확한 규명을 위해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 표면의 강한 전하에 의한 충전 방해 효과 등은 컴솔과 같은 시뮬레이션 툴을 이용한 정전기 모델링과 전극의 재질과 코팅 종류를 바꾸어 가며 비교 실험을 추가하여 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 비전도성 매질 내에서 전도성 액적의 접촉 충전 현상(ECD)에서 액적과 전극 간 접촉으로 인해 발생하는 습윤현상, 전극 표면의 산화와 같은 문제의 해결을 위해 ECD 실험에 사용되는 전극에 소수성 코팅의 적용가능성을 실험적으로 확인하였다. 연

마만을 진행한 전극에서의 실험을 대조군으로 설정하여 소수성 코팅으로 Teflon과 Thiol 코팅을 적용하여 액적 충전 실험을 진행하였다. 액적 접촉 충전량은 전극의 소수성 코팅 종류에 따라 변화가 있었으며 Thiol 코팅의 경우 이전 연구에서 보고된 바 없는 특이한 충전 거동과 매우 낮은 충전량을 보였다. Teflon 코팅은 대조군 대비 접촉각이 평균 약 10° 증가하여 소수성 특성을 보였지만 대조군 대비 액적 충전량이 약 90% 정도 수준을 보였으며 동일 실험 조건 내에서의 충전량의 편차도 더 크게 나타났다. Thiol 코팅은 대조군 대비 접촉각이 평균 약 21° 증가하여 Teflon 대비 소수성 특성은 더 뛰어났으나 양극에서의 전하 충전이 거의 일어나지 않아 (이론치 대비 약 20% 수준) 대조군 대비 약 40% 수준의 매우 낮은 충전량을 보였다. Thiol 코팅이 보이는 특이한 충전 거동은 Thiol 코팅의 강한 표면 전하에 기인한 것으로 추정되나 추후 추가적인 연구를 통한 확인이 필요하다. 실험결과를 토대로 ECD 실험에 사용되는 전극 표면에 소수성 코팅을 진행해야 할 경우, Teflon 코팅을 적용하는 것이 가능하나 표면의 균일한 코팅을 위한 추가적인 보완이 필요할 것으로 판단된다. Thiol 코팅의 경우, 소수성 특성은 매우 우수하나 특이한 접촉 충전 거동 및 충전량의 급격한 변화로 ECD 실험에 사용하는 전극의 소수성 코팅으로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 연구되었습니다.

Reference

- Im, D. J., Noh, J., Moon, D. and Kang, I. S., "Electrophoresis of a Charged Droplet in a Dielectric Liquid for Droplet Actuation," *Anal. Chem.* **83**, 5168-5174(2011).
- Im, D. J., Yoo, B. S., Ahn, M. M., Moon, D. and Kang, I. S., "Digital Electrophoresis of Charged Droplets," *Anal. Chem.* **85**, 4038-4044(2013).
- Schoeler, A. M., Josephides, D. N., Sajjadi, S., Lorenz, C. D. and Mesquida, P., "Charge of Water Droplets in Non-polar Oils," *J. Appl. Phys.* **114**, 144903(2013).
- Abdelgawad, M. and Wheeler, A. R., "The Digital Revolution: A New Paradigm for Microfluidics," *Adv. Mater.* **21**, 920-925 (2009).
- Jung, J. H. and Lee, C. S., "Droplet Based Microfluidic System," *Korean Chem. Eng. Res.* **48**, 545-555(2010).
- Nam, J. O., Choi, C. H., Kim, J., Kang, S. M. and Lee, C. S., "Fabrication of Polymeric Microcapsules in a Microchannel Using Formation of Double Emulsion," *Korean Chem. Eng. Res.* **51**, 597-601(2013).
- Mukhopadhyay, R., "Diving Into Droplets," *Anal. Chem.* **78**, 1401-1404(2006).
- Ochs, H. T. and Czys, R. R., "Charge Effects on the Coalescence of Water Drops in Free Fall," *Nature* **327**, 606-608(1987).
- Ristenpart, W. D., Bird, J. C., Belmonte, A., Dollar, F. and Stone, H. A., "Non-coalescence of Oppositely Charged Drops," *Nature* **461**, 377-380(2009).
- Yudistira, H. T., Nguyen, V. D., Tran, S. B. Q., Kang, T. S., Park,

- J. K. and Byun, D., "Retreat Behavior of a Charged Droplet for Electrohydrodynamic Inkjet Printing;" *Appl. Phys. Lett.* **98**, 083501 (2011).
11. Park, J. U., Hardy, M., Kang, S. J., Barton, K., Adair, K., Mukhopadhyay, D. K., Lee, C. Y., Strano, M. S., Alleyne, A. G., Georgiadis, J. G., Ferreira, P. M. and Rogers, J. A., "High-resolution Electrohydrodynamic Jet Printing;" *Nat. Mater* **6**, 782-789(2007).
 12. Eow, J. S. and Ghadiri, M., "Electrostatic Enhancement of Coalescence of Water Droplets in Oil: A Review of the Technology;" *Chem. Eng. J.* **85**, 357-368(2002).
 13. Eow, J. S., Ghadiri, M., Sharif, A. O. and Williams, T. J., "Electrostatic Enhancement of Coalescence of Water Droplets in Oil: A Review of the Current Understanding;" *Chem. Eng. J.* **84**, 173-192(2001).
 14. Im, D. J., Jeong, S., Yoo, B. S., Kim, B., Kim, D. P., Jeong, W. J. and Kang, I. S., "Digital Microfluidic Approach for Efficient Electroporation: Gene Transformation of Microalgae Without Cell Wall Removal;" *Anal. Chem.* **87**, 6592-6599(2015).
 15. Im, D. J. and Jeong, S.-N., "Transfection of Jurkat t Cells by Droplet Electroporation;" *Biochem. Eng. J.* **122**, 133-140(2017).
 16. Bae, S. J., Lee, S. J., Heo, J. U. and Im, D. J., "Syringe Pump-embedded, on-demand Sample Supply and Collection System for Droplet 3d Cell Culture in Digital Microfluidics;" *Sens. Actuator B-Chem.* **419**, 136439(2024).
 17. Bae, S. J., Choi, S. H. and Im, D. J., "3d Cell Culture Method in Channel-free Water-in-oil Droplets;" *Small Methods* **8**, 2301145 (2024).
 18. Bae, S. J., Lee, S. J. and Im, D. J., "Simultaneous Separating, Splitting, Collecting, and Dispensing by Droplet Pinch-off for Droplet Cell Culture;" *Small* **20**, 2309062(2024).
 19. Im, D. J., "Next Generation Digital Microfluidic Technology: Electrophoresis of Charged Droplets;" *Korean J. Chem. Eng.* **32**, 1001-1008(2015).
 20. Im, D. J., Ahn, M. M., Yoo, B. S., Moon, D., Lee, D. W. and Kang, I. S., "Discrete Electrostatic Charge Transfer by the Electrophoresis of a Charged Droplet in a Dielectric Liquid;" *Langmuir* **28**, 11656-11661(2012).
 21. Drews, A. M., Cartier, C. A. and Bishop, K. J. M., "Contact Charge Electrophoresis: Experiment and Theory;" *Langmuir* **31**, 3808-3814 (2015).
 22. Kurimura, T., Ichikawa, M., Takinoue, M. and Yoshikawa, K., "Back-and-forth Micromotion of Aqueous Droplets in a Dc Electric Field;" *Phys. Rev. E* **88**, 042918(2013).
 23. Im, D. J., "Wall Effects on Hydrodynamic Drag and the Corresponding Accuracy of Charge Measurement in Droplet Contact Charge Electrophoresis;" *Langmuir* **36**, 4785-4794(2020).
 24. Im, C. Y. C. a. D. J., "Contact Charging and Electrophoresis of a Glassy Carbon Microsphere;" *Korean Chem. Eng. Res.* **54**, 568-573(2016).

Authors

Hyo Chan Kim: Undergraduate Student, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea; gyqja123@naver.com

Seo Jun Bae: Postdoc, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea; sinelf@pukyong.ac.

Do Jin Im: Professor, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea; dj-im@pknu.ac.kr