

유리상 탄소입자의 직접 접촉충전에 의한 전기영동 현상연구

최창용 · 임도진[†]

국립부경대학교 화학공학과
48547 부산광역시 남구 신전로 365
(2016년 2월 1일 접수, 2016년 4월 23일 수정본 접수, 2016년 4월 27일 채택)

Contact Charging and Electrophoresis of a Glassy Carbon Microsphere

Chang Yong Choi and Do Jin Im[†]

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, 48547, Korea
(Received 1 February 2016; Received in revised form 23 April 2016; accepted 27 April 2016)

요 약

본 연구에서는 고체 입자인 유리상 탄소입자와 액체인 수용액적을 이용한 접촉충전 비교 실험을 수행하여 액적 접촉충전 현상에 적용했던 완전도체 이론 적용의 적합성 및 고체 도체의 접촉충전 특성을 살펴보았다. 동일한 실험 장치 내에서 비슷한 크기의 수용액적과 유리상 탄소입자를 이용해 가해진 전기장의 세기와 입자의 크기를 변화시키며 충전량을 측정하고 완전도체 이론과의 비교를 통해 충전 특성을 분석하였다. 유리상 탄소입자의 접촉충전 현상은 기본적으로 완전 도체 이론으로 설명이 가능하였으나 실제 충전되는 충전량은 이론치 대비 70~80% 수준으로 측정되었으며 이는 고체 입자가 전극과 접촉하여 전하가 전달되는 과정 중 전극과 오일 사이 오일 필름의 형성으로 주어진 짧은 시간 내에 충분한 전하의 전달이 이루어지지 못해 나타난 것으로 추정된다. 본 연구 결과는 고체 도체의 접촉충전 특성에 대한 이해를 높여 향후 이 분야에 중요한 기초 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – We investigated the charging characteristics of a conducting solid sphere (glassy carbon sphere) comparing with that of a water droplet and check the applicability of the perfect conductor theory. For the systematic research, sphere size, applied voltages, viscosity of the medium were changed and the results were compared with that of corresponding water droplets and the perfect conductor theory. Basically, a glassy carbon sphere follows the perfect conductor theory but the charging amount was lower as much as 70~80% of theoretical prediction value due to oil film formed between electrode and a carbon sphere. We hope this result provides basic understandings on the solid sphere contact charging phenomenon and related applications.

Key words: Glassy carbon, Contact charging, Electrophoresis

1. 서 론

최근 새로운 미세유체 기술로써 액적 접촉충전 현상이 여러 분야에서 활발히 연구되고 있다[1-12]. 액적 접촉충전 현상 기반의 미세유체 기술은 개별 액적을 전기를 이용해 다루는 디지털 미세유체 기술의 한 분야로[13,14], 채널 내 액적을 다루는 액적 미세유체(Droplet Microfluidics)[15,16] 기술과는 다르며 기존 미세유체 기술들의 단점을 극복할 수 있어 새로운 대안 기술로 제시되고 있는 신기술이다 [17,18]. 액적 접촉충전 현상은 비전도성 매질 내 존재하는 전도성 액적이 고압의(약 3 kV/cm) 전극에 직접 접촉하면 접촉과

동시에 액적이 전극과 같은 전하로 충전되면서 전기적 반발력에 의해 반대편 전극으로 이동하는 전기수력학 현상이다. 이 현상의 흥미로운 점은 반대편 전극으로 이동된 충전 액적이 전극에 접촉하면 이전에 가지고 있던 전하의 방전과 함께 다시 이전과 반대 극성의 전하로 충전되면서 다시 처음 접촉했던 전극으로 되돌아가 두 전극 사이에서 지속적인 왕복 운동을 하게 되는 점이다. 이 현상은 공기 중 빗방울의 응집 원리 등 대기과학[4,19] 이나 오일과 수용액 사이의 계면 장력 측정[20] 혹은 이온성 액체에서 이온의 선택적 분리[21] 등 물리화학 분야와 같은 자연과학 분야에서 하나의 독립된 기초연구 분야를 형성해 가고 있다. 또한 액적 접촉충전 현상은 화학공학 측면에서는 해양에서 시추한 원유에서 바닷물을 분리하는 원유의 탈수 공정 개발[22,23]에 활용되고 있으며 전기를 이용한 전기 프린팅(Electrohydrodynamic, EHD) 기술에서 전하를 띄는 잉크 액적의 거동을 예측하고 이해하는 데 활용되는 등 산업적으로도 이용 가치가 높다[24,25].

[†]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.

2000년 중반까지 이 현상에 대한 기본적인 이해의 틀이나 가설 등은 정립되어 있지 않았고 각각의 연구들이 서로 개연성 없이 산발적으로 진행되고 있는 태동기였다[17]. 이후 많은 연구자들에 의해 액적의 접촉충전 현상 분석을 위한 기본적인 전하 측정 실험 장치 및 방법이 제안되고 체계적인 전하 측정 및 분석연구가 수행되어 이 현상이 기본적으로는 고전적인 정전기적 이론의 하나인 완전 도체 이론으로 설명할 수 있음이 알려졌다[26-28]. 하지만 완전 도체로 가정하기에 물의 전기 전도도는 일반적인 금속 도체에 비해 매우 낮고 아직도 액적 충전량을 측정하는데 있어 완전 도체 이론을 적용하는데 이견이 있는 것이 사실이다[17,29]. 또한 액체 액적의 경우 고체와 달리 충전 시 모양이 변하고 전하의 전달 메커니즘 역시 자유전자의 흐름으로 단순히 전달 된다고 볼 수 없는 등 기존 완전 도체 이론을 적용하는데 있어 여러 한계가 존재한다. 따라서 접촉충전 현상에 대한 보다 명확한 이해를 위해서는 고체 도체와 액체 액적을 동일한 시스템 내에서 비교 분석하여 충전량 등을 측정하고 해석하는 연구가 필요하다. 최근 고체 도체를 이용해 접촉충전 실험을 수행한 결과가 보고 되었다[30]. 하지만 이 연구는 미세 채널 내 혼합을 목적으로 한 응용 연구로써 도체의 충전량 등 기초적인 정량분석이 부재하여 앞서 언급된 문제를 분석하고 해결하는데 활용할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 고체 도체와 액체 액적을 이용한 접촉충전 비교 실험을 수행하여 액적 접촉충전 현상에 적용했던 완전도체 이론 적용의 적합성 및 고체 도체의 접촉충전 특성을 살펴보고자 한다. 고체 도체로 금속을 사용할 경우 오일과의 밀도 차이가 너무 커서 기존 실험 장치 내에서 실험이 불가능하다. 따라서 전기 전도도가 물보다 충분히 높아 도체로 가정할 수 있으면서도 밀도가 금속보다 충분히 낮아 기존 실험 장치 내에서 실험이 가능한 유리상 탄소입자를 고체 도체로 사용하여 실험을 수행하였다. 동일한 실험 장치 내에서 비슷한 크기의 액체 액적과 유리상 탄소입자를 이용한 비교 실험을 수행하여 각각의 전기영동 속도분포 특성을 비교하고 중심 속도로부터 충전량을 측정하고 비교하였다. 또한 가해진 전기장의 세기와 입자의 크기를 변화시키며 충전량을 측정하고 완전도체 이론과의 비교를 통해 충전 특성을 분석하였다. 특히 유리상 탄소입자의 충전특성 거동을 보다 면밀히 분석하기 위해 오일의 점도를 변화시키며 충전량 변화를 살펴봄으로써 유리상 탄소입자가 액체 액적과 다른 충전 특성을 보이는 원인에 대해 분석하였다. 마지막으로 본 연구가 액적의 접촉충전 현상 연구 분야에서 가지는 의미 및 향후 이 분야에의 적용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치

유리상 탄소입자와 액체 액적의 접촉충전 실험에 사용된 장치에 대한 개략도는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 접촉충전에 사용될 전극은 구리판 전극을(폭 1 cm × 높이 4 cm) 이용하였고 아크릴 구조물을 활용해 Fig. 1 중앙에 나타난 것과 같이 평행한 두 전극 쌍을(전극간 거리 약 9 mm) 구성하여 실리콘 오일이 담긴 투명한 cuvette에 삽입하였다. 유리상 탄소입자와 액체 액적은 아크릴 구조물 중앙에 위치한 구멍(직경 3 mm)을 통해 마이크로 피펫을 사용해 cuvette 안쪽으로 투입하였다. 양쪽 전극은 고압 전원 장치의 양극과 음극에 각각 연결하여 일정한 크기의 전압을(2.5~4.5 kV) 인가하였다. 유리상 탄소입자와 액적의 움직임을 관찰하기 위한 디지털카메라와

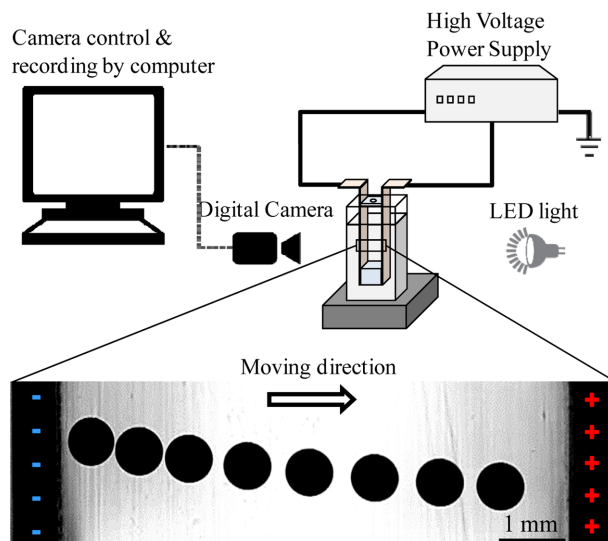


Fig. 1. Schematic of experimental setup.

(Cannon EOS 100D) LED 조명을 역광으로 배치하여 탄소입자가 왕복 운동하는 동안 움직임을 동영상으로 촬영하여 저장하였다. 실험 장치에 대한 보다 자세한 설명은 이전 연구에서[26,27] 찾을 수 있다.

2-2. 실험재료

접촉충전 실험을 하기 위해서는 앞서 설명한 바와 같이 cuvette 내에 비전도성 매질을 채워야 한다. 본 연구에 사용된 비전도성 매질은 실리콘 오일(Shin-Etsu KF-96) 동점도가 100 cSt, 밀도는 970 kg/m³이며 전기 전도도는 6.87 × 10⁻¹⁴ S/m이다. 오일의 점도 영향을 살펴 보기 위해 동점도가 1000 cSt인 오일을 사용한 실험도 추가적으로 수행하였다(밀도 980 kg/m³, 전기 전도도 6.87 × 10⁻¹⁴ S/m). 고체 도체로는 유리상 탄소입자(Alfa Aesar, 밀도 1420 kg/m³, 전기 전도도 10⁴ S/m)를 사용하였고 액체 액적으로는 초순수(J. T. Baker)를 사용하였다. 고체 도체로 금속이 아닌 유리상 탄소입자를 사용한 이유는 접촉충전 실험 장치 내에서 비전도성 매질인 실리콘오일과 밀도 차이가 큰 금속구를 사용할 경우 전기력에 의한 좌우 수평 운동 대비 중력에 의한 수직 방향으로의 하강속도가 너무 빨라 실험이 불가능하기 때문이다. 유리상 탄소입자의 경우, 실리콘 오일과의 밀도 차이가 상대적으로 작기 때문에 Fig. 1 하단에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용된 접촉충전 실험 장치 내에서 실험이 가능했다.

2-3. 실험방법

접촉충전 실험 과정은 다음과 같다. 먼저, 준비된 큐벳에 실리콘 오일을 채우고 전극 쌍을 이 큐벳에 장착한다. 장착된 전극 쌍 양쪽을 고전압 전원장치의 양극과 음극에 각각 연결한다. 고전압 전원장치를 켜면 두 전극 사이에 높은 전기장이 생성되며(3~5 kV/cm) 이 상태에서 시스템이 평형을 유지할 때까지 약 30분간 유지한다. 평형 상태에 있는 전극 사이에 마이크로 피펫을 이용해 직경 0.6~0.8 mm 크기의 유리상 탄소입자를 투입하면 투입된 입자는 Fig. 1 하단에 나타난 것과 같이 두 전극 사이에서 왕복 운동을 하게 된다. 탄소입자의 움직임은 카메라를 통해 기록되며 컴퓨터를 통해 동영상 정보가 저장된다. 저장된 동영상으로부터 각 시간 별 액적의 위치가 나타난 사진을 추출한 후 이미지 분석 프로그램(Levive vision assistant)

활용하여 시간에 따른 액적의 위치 정보를 얻어낸다. 시간에 따른 액적의 위치 정보를 활용하면 액적의 수평, 수직 방향의 이동 속도를 추정할 수 있으며 이 때 수평 방향 속도는 전기력에 의해 움직이는 속도에 해당된다. 본 실험 시스템에서 중심 부근에서 입자의 속도는 일정하게 유지되는데 이는 입자에 가해지는 전기력과 오일에 의해 입자에 작용하는 저항력이 힘의 균형을 이루기 때문으로 스톡스 영역(Stokes regime)을 가정한 저항력 계산을 이용하면 충전된 입자가 가지고 있는 총 전하량을 추정할 수 있게 된다[27]. 접촉충전으로 움직이는 입자의 전하량 추정 및 실험 과정에 대한 보다 상세한 내용은 이전 연구에서 확인이 가능하다[26].

3. 결과 및 고찰

3-1. 유리상 탄소입자와 수용액적의 운동속도 분포 비교

유리상 탄소입자와 수용액적의 충전 거동 비교를 위해 먼저 Fig. 2에서는 시간에 따른 위치 변화 정보를 이용해 시간에 따른 속도 변화를 구하여 비교해 보았다. 음극에서 양극으로의 운동 방향을 양의 방향으로 정의하였기 때문에 입자가 양의 속도로 움직이는 것은 음극에서 양극으로 이동하는 운동에 해당하고 반대로 양극에서 음극으로 이동하는 움직임은 음의 속도로 나타나게 된다. 따라서 입자의 속도가 양에서 음으로 혹은 음에서 양으로 바뀌는 지점이 입자가 전극에 부딪히는 순간에 해당된다. 유리상 탄소입자의 경우 Fig. 2a에 나타난 바와 같이 전극 근방에서 머무는 시간이 수용액적 대비 매우 긴 것을 확인할 수 있다(데이터 포인트 간 시간 간격이 대략 1/50 초에 해당되므로 수용액적의 경우 전극에 접촉하는 시간이 1/50 초 이하라는 것을 알 수 있다). 또한 수용액적과 비교해 유리상 탄소입자의 경우 최대 속도가 일정하지 않고 속도의 분포 역시 매우 불규칙적인

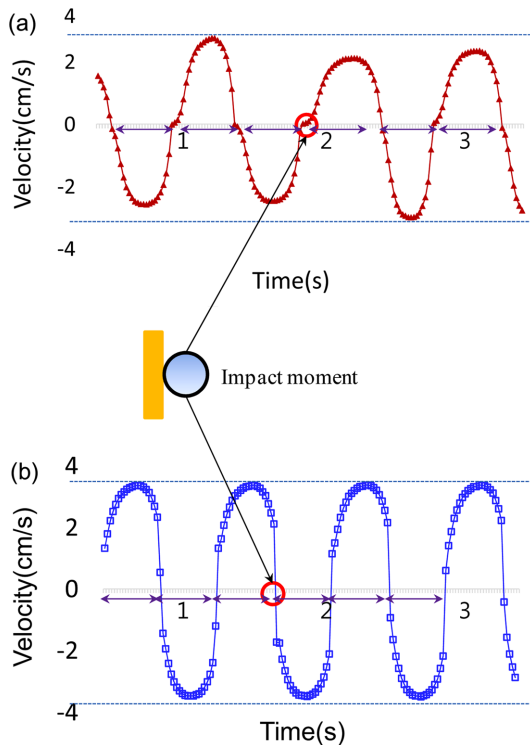


Fig. 2. Comparison of the velocity distribution of (a) a glassy carbon sphere and (b) a water droplet.

특징을 보인다. 수용액적의 경우 Fig. 2b에 보이는 것과 같이 최대 속도가 항상 일정한 값을 가지고 속도의 분포 역시 매우 일관된 것을 볼 수 있다. 이는 이전 연구에서 확인한 바와 같이 수용액적의 충전량이 항상 일관되게 일정한 값을 가지기 때문이며 유리상 탄소입자는 이와 달리 충전량이 일관되지 못하고 충전량이 매 충전 시 변화가 많음을 알 수 있다.

3-2. 전기장의 세기 및 유리상 탄소입자 크기에 따른 충전량 변화

Fig. 2에 나타난 유리상 탄소입자와 수용액적의 경우, 비슷한 크기를 (직경 약 0.74 μm) 가진다. 하지만 두 경우의 최대 속도를 비교해 보면 탄소입자가 수용액적 대비 상당히 낮음을 알 수 있다. 이로부터 우리는 유리상 탄소입자가 전기 전도도가 더 낮은 수용액적 대비 오히려 더 적은 전하로 충전된다고 추정해 볼 수 있다. 하지만 완전 도체 이론 대비 얼마나 덜 충전이 되는지를 판단하기 위해서는 보다 정확한 정량 분석이 필요하다. 완전 도체 이론에 따르면 무한한 평판 전극에 접촉한 반지름 a인 구형 도체 입자는 다음의 식에서부터 추정되는 이론 충전량을 가진다.

$$Q_{theory} = \frac{\pi^2}{6} (4\pi a^2) \epsilon E$$

여기서 ε는 도체가 담겨있는 물질의 전기유전율을 나타내고 E는 인가된 전기장의 세기를 나타낸다. 이론식으로부터 구형 입자의 충전량은 반지름 제곱에 비례하고 인가된 전기장의 세기에 비례함을 알 수 있다. 따라서 유리상 탄소입자의 크기와 전기장의 세기를 변화시키며 측정된 충전량을 이론치와 비교해 보면 탄소입자의 충전 거동이 완전 도체 이론에 얼마나 근접한 거동을 보이는 지 확인할 수 있다.

Fig. 3에는 탄소입자의 크기와 전기장의 세기를 변화시키며 측정

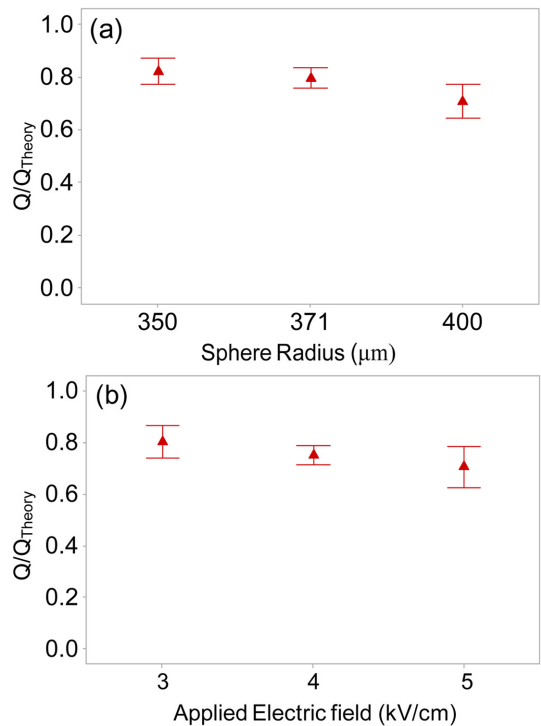


Fig. 3. Effects of sphere size and electric field on the dimensionless charge (a) Size effects (Applied electric field was 4 kV/cm) (b) Applied electric field effects (sphere radius was 371 μm).

한 무차원 전하량이 나타나 있다. 무차원 전하량이 '1'에 근접할수록 입자의 충전 거동이 완전 도체 이론치와 일치한다고 할 수 있다. 하지만 유리상 탄소입자의 경우 Fig. 3에 나타난 바와 같이 입자의 크기나 전기장의 세기와 상관 없이 이론치의 70~80%에 해당되는 낮은 전하량을 가짐을 확인할 수 있다. 이론치 대비 낮은 전하량을 가지는 것을 제외하면 무차원 전하량이 입자의 크기나 전기장의 세기에 큰 영향을 받지 않고 일정한 것으로 보아 탄소입자의 전체적인 충전 거동은 완전도체 이론을 따른다고 볼 수 있다.

3-3. 수용액적과 유리상 탄소입자의 접촉충전 전하량 비교

유리상 탄소입자의 경우 전체적인 충전 거동은 완전도체 이론으로 설명이 가능하나 이론치 대비 낮은 전하량으로 충전되는 현상에 대한 보다 체계적인 고찰이 필요하다. 탄소입자와 수용액적의 충전 시 가장 큰 차이 중 하나는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 전극 접촉 시 전극에 머무는 시간이다. 탄소입자의 경우 수용액적 대비 전극 표면에 머무는 시간이 긴 것은 전극과 입자 사이에 형성되는 오일 필름을 제거하는 데 필요한 시간 때문으로 추정된다. 수용액적의 경우 Fig. 4b에 나타난 바와 같이 충전 시 액적의 모양이 변하면서 뾰족한 액주 (liquid bridge)가 형성되어 아주 짧은 시간 안에 (1/50초 이내) 접촉충전이 이루어 지는데 반해 탄소입자의 경우 이러한 접촉충전 거동을 보일 수 없는 구조를 가지고 있다.

유리상 탄소입자의 접촉충전에 있어 오일 필름 형성에 따른 충전 방해 메커니즘에 대한 보다 명확하고 정량적인 분석을 위해 동일한 시스템 하에서 유리상 탄소입자와 수용액적의 충전량 측정 비교 실험을 수행하였다. Fig. 4a에는 탄소입자와 수용액적의 크기와 전기장 세기를 변화시키며 측정된 무차원 충전량이 나타나 있다(동일 전

기장 하에서 서로 다른 데이터는 각각 서로 다른 크기의 입자를 사용한 데이터이며 좌표축에서 양의 x 방향으로 진행할수록 입자의 크기가 큰 경우에 해당된다). 수용액적의 경우, 이전 연구 결과에서 확인한 바와 같이 이론치의 90~100%에 해당하는 충전량을 보이는데 반해 탄소입자는 이보다 낮은 70~80% 수준의 무차원 충전량을 가짐을 확인할 수 있다. 측정 오차와 실험 간 편차를 고려하더라도 탄소입자의 충전량이 동일 조건에서 수용액적 대비 확실히 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 유리상 탄소입자의 충전량이 이론치 대비 낮게 나타나는 현상은 앞서 설명한 바와 같이 탄소입자와 전극간 오일 필름의 형성에 기인한 것으로 추정된다. 즉, 오일 필름의 존재 때문에 탄소입자는 전극에서 일정 시간 이상을 머물게 되고 오일 필름이 충전에 필요한 전하의 흐름을 방해하고 충전이 이론치에 도달하기 전에 충전된 입자가 반대편 전극으로 튕겨져 나가 충분히 충전되지 못하는 것으로 추정된다. 수용액적 대비 충전량의 편차가 큰 것 또한 이러한 가설을 뒷받침 한다.

3-4. 외부 부도체 오일의 점도 영향

앞선 실험 결과 유리상 탄소입자가 전극과 입자간 오일 필름에 의해 충분히 충전되지 못하는 메커니즘에 의해 완전 도체 이론과 수용액적 대비 낮은 충전량을 보임이 하나의 가설로 제안되었다. 이러한 가설을 뒷받침 하는 한 예는 Fig. 3에서와 같이 입자의 크기가 커지거나 전기장의 세기가 커짐에 따라 무차원 충전량이 다소 감소하는 경향을 보이는 것이다. 이러한 경향은 통계적으로 유의한 차이는 아니나 입자를 반대편 전극으로 튕겨나가게 하는 절대적인 임계 전하량이 존재한다고 가정한다면 이러한 경향을 설명할 수 있다. 즉, 최대 전하량에 도달하기 전에 임계 전하량에 도달하는 비율이 절대 전하량이 높아짐에 따라 상대적으로 낮아질 수 있으므로 입자의 크기가 커지거나 전기장의 세기가 커짐에 따라 입자를 반대편 전극으로 튕겨 나가게 하는 무차원 전하량이 낮아질 수 있는 것이다. 예를 들어 입자를 전극에서 튕겨 나가게 하는데 0.8 pC의 전하량이 필요하다고 가정해 보자. 주어진 입자의 크기와 전기장 세기로부터 계산된 이론 전하량이 1 pC인 입자의 경우 전극에서 오일막의 존재로 이론치인 1 pC에 도달하기 전에 0.8 pC의 전하를 얻자마자 반대편 전극으로 튕겨져 나가게 되면 입자는 무차원 전하 0.8을 가지게 된다. 만일 전기장의 세기를 2배로 증가시키면 이론 전하량은 2 pC이 되지만 0.8 pC을 얻자마자 튕겨져 나와 무차원 전하 0.4를 가지게 될 것이다. 물론, 더 높은 전기장 하에서는 입자의 속도가 더 빨라질 것이므로 0.8 pC보다는 더 많은 전하를 충전할 가능성이 높아지게 될 것이기 때문에 실제 실험에서는 무차원 전하 0.4보다 높은 값을 가지게 될 것이다. 따라서 실제 무차원 전하는 0.8과 0.4 사이에 위치하게 되어 전기장의 세기가 커짐에 따라 조금씩 무차원 전하가 낮아지는 경향을 설명하는 것이 가능하다.

탄소입자의 접촉충전 시 오일 필름 형성에 의한 접촉충전 방해 메커니즘 가설에 대한 추가적인 증명을 위해 외부 오일의 점도를 변화시키며 충전량의 변화를 Fig. 5에 나타난 바와 같이 살펴보았다. 외부 부도체 오일의 점도가 증가하게 되면 오일 필름을 제거하는데 더 많은 시간이 걸려 충전량이 더 낮아질 것이라고 예상할 수 있는데 이러한 예상은 Fig. 5 실험 결과에서 확인이 가능하다. 수용액적의 경우도 점도가 증가하면서 무차원 전하가 감소하였으나 이 경우는 무차원 전하가 '1'보다 큰 경우에서 낮아지는 경우이고 감소의 폭도 유리상 탄소입자보다 낮게 나타난다. 수용액적이 접촉충전 시 표면

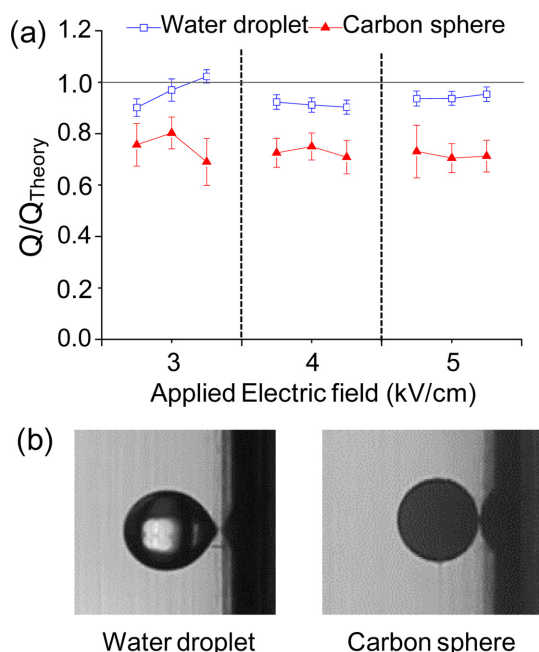


Fig. 4. Comparison of charging behavior of a glassy carbon sphere and a water droplet (a) Dimensionless charges of a water droplet (from left to right, radius of 432, 449, 479, 445, 450, 468, 470, 480 μm) and a carbon sphere (from left to right, radius of 329, 421, 425, 386, 417, 449, 362, 381, 404 μm) (b) Photos of 0.9 mm sized water droplet and carbon sphere at the moment of charging on electrode surface.

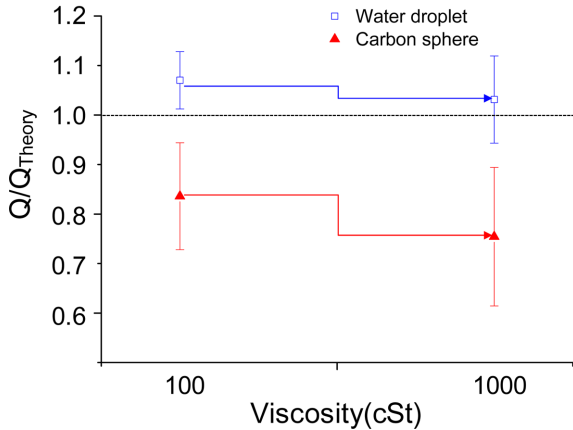


Fig. 5. Effects of outer medium viscosity on the dimensionless charges.

적이 증가하면 구형으로 가정한 이론치 대비 높은 전하를 가지게 되는데 외부 부도체 오일의 점도가 증가하면 이러한 변형이 상대적으로 덜 일어나면서 무차원 충전량이 감소하는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 유리상 탄소입자의 충전량이 이론치 대비 낮게 나타나는 현상은 입자와 오일간 생성된 오일 필름 때문인 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 유리상 탄소입자와 수용액적을 이용한 접촉충전 비교 실험을 수행하여 액적 접촉충전 현상에 적용했던 완전도체 이론 적용의 적합성 및 고체 도체의 접촉충전 특성을 살펴보았다. 동일한 실험 장치 내에서 비슷한 크기의 수용액적과 유리상 탄소입자를 이용한 비교 실험을 수행하여 각각의 전기영동 속도분포 특성을 비교하고 중심 속도로부터 충전량을 측정하고 비교하였다. 또한 가해 준 전기장의 세기와 입자의 크기를 변화시키며 충전량을 측정하고 완전도체 이론과의 비교를 통해 충전 특성을 분석하였다. 실험결과 유리상 탄소입자의 접촉충전 현상은 전체적으로 완전 도체 이론으로 설명이 가능하였으나 실제 충전되는 충전량은 이론치 대비 70~80% 수준으로 측정되었다. 이는 유리상 탄소입자가 물보다 높은 전기 전도도를 가짐에도 수용액적 충전 시 액주(liquid bridge)를 형성하여 짧은 시간 안에 이론치에 해당하는 전하의 충전이 가능한 것과 달리 고체가 전극과 접촉하여 전하가 전달되는 과정 중 전극과 오일 사이 오일 필름의 형성으로 주어진 짧은 시간 내에 충분한 전하의 전달이 이루어지지 못하여 이론치 대비 낮게 충전되는 것으로 추정된다. 오일 필름에 의한 충전 방해 메커니즘에 대한 추가 검증을 위해 외부 부도체 오일의 점도를 변화시키며 충전량 변화를 살펴본 결과 이러한 가설이 유효함을 확인하였다. 본 연구 결과는 기존 액체 액적의 접촉충전 현상에 적용했던 완전도체 이론 적용의 적합성 평가 및 고체 도체의 접촉충전 특성에 대한 이해를 높여 향후 이 분야에 중요한 기초 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Eow, J. S. and Ghadiri, M., "Motion, Deformation and Break-up of Aqueous Drops in Oils Under High Electric Field Strengths," *Chem. Eng. Process.*, **42**, 259-272(2003).
2. Hase, M., Watanabe, S. N. and Yoshikawa, K., "Rhythmic Motion of a Droplet Under a Dc Electric Field," *Phys. Rev. E.*, **74**, 046301 (2006).
3. Kim, J. G., Im, D. J., Jung, Y. M. and Kang, I. S., "Deformation and Motion of a Charged Conducting Drop in a Dielectric Liquid Under a Nonuniform Electric Field," *J. Colloid. Interf. Sci.*, **310**, 599-606(2007).
4. 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).
5. Im, D. J., Noh, J., Yi, N. W., Park, J. and Kang, I. S., "Influences of Electric Field on Living Cells in a Charged Water-in-oil Droplet Under Electrophoretic Actuation," *Biomicrofluidics* **5**, 044112(2011).
6. Ahn, B., Lee, K., Panchapakesan, R. and Oh, K. W., "On-demand Electrostatic Droplet Charging and Sorting," *Biomicrofluidics* **5**, 024113(2011).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. Zhang, Y. Z., Liu, Y. H., Wang, X. L., Shen, Y., Ji, R. J. and Cai, B. P., "Investigation of the Charging Characteristics of Micrometer Sized Droplets Based on Parallel Plate Capacitor Model," *Langmuir* **29**, 1676-1682(2013).
11. Schoeler, A. M., Josephides, D. N., Chaurasia, A. S., Sajjadi, S. and Mesquida, P., "Electrophoretic Manipulation of Multiple-emulsion Droplets," *Appl. Phys. Lett.*, **104**, 074104(2014).
12. Drews, A. M., Cartier, C. A. and Bishop, K. J. M., "Contact Charge Electrophoresis: Experiment and Theory," *Langmuir* **31**, 3808-3814(2015).
13. Mukhopadhyay, R., "Diving Into Droplets," *Anal. Chem.*, **78**, 1401-1404(2006).
14. Abdelgawad, M. and Wheeler, A. R., "The Digital Revolution: A New Paradigm for Microfluidics," *Adv. Mater.*, **21**, 920-925 (2009).
15. Jung, J. H. and Lee, C. S., "Droplet Based Microfluidic System," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**, 545-555(2010).
16. 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).
17. Im, D. J., "Next Generation Digital Microfluidic Technology: Electrophoresis of Charged Droplets," *Korean J. Chem. Eng.*, **32**, 1001-1008(2015).
18. 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).
19. Ochs, H. T. and Czys, R. R., "Charge Effects on the Coalescence of Water Drops in Free Fall," *Nature* **327**, 606-608(1987).
20. Lee, D. W., Im, D. J. and Kang, I. S., "Measurement of the Interfacial Tension in An Ionic Liquid-dielectric Liquid System Using an Electrically Deformed Droplet," *J. Phys. Chem. C.*, **117**, 3426-3430(2013).
21. Ahn, M. M., Im, D. J., Kim, J. G., Lee, D. W. and Kang, I. S., "Extraction of Cations from an Ionic Liquid Droplet in a Dielectric Liquid Under Electric Field," *J. Phys. Chem. Lett.*, **5**, 3021-3025 (2014).
22. 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).
23. 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).
24. 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).
25. Yulistira, 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).
26. 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).
27. 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).
28. Ahn, M. M., Im, D. J. and Kang, I. S., "Geometric Characterization of Optimal Electrode Designs for Improved Droplet Charging and Actuation," *Analyst* **138**, 7362-7368(2013).
29. Hamlin, B. S. and Ristenpart, W. D., "Transient Reduction of the Drag Coefficient of Charged Droplets via the Convective Reversal of Stagnant Caps," *Phys. Fluids.*, **24**, 012101-012112(2012).
30. Drews, A. M., Lee, H.-Y. and Bishop, K. J. M., "Ratcheted Electrophoresis for Rapid Particle Transport," *Lab. Chip.*, **13**, 4295-4298 (2013).