

미세유체시스템 제작을 위한 3D 프린팅 방식 및 소재 별 표면특성 비교

배서준 · 임도진[†]

부경대학교 화학공학과
48547 부산광역시 남구 신선로 365
(2019년 3월 16일 접수, 2019년 4월 19일 수정본 접수, 2019년 4월 23일 채택)

Comparison of Surface Characteristics According to 3D Printing Methods and Materials for the Fabrication of Microfluidic Systems

Seo Jun Bae and Do Jin Im[†]

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseorl-ro, Nam-gu, Busan, 48547, Korea
(Received 16 March 2019; Received in revised form 19 April 2019; accepted 23 April 2019)

요 약

본 연구에서는 미세유체 시스템 제작에 적합한 3D 프린팅 방식 및 소재 별 표면특성 분석을 통해 각 응용 사례에 적합한 프린터 및 소재 선정에 가이드라인을 줄 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 가장 보편적으로 사용되는 적층 방식과 해상도가 상대적으로 높은 광경화 방식에 대해 프린팅 방식과 소재에 따른 표면 특성을 살펴보았다. 적층 방식의 프린트물은 소재에 무관하게 후처리 전에는 친수성 특성을 보이나 아세톤 증기에 의한 후처리 후에는 소수성 특성을 보임을 확인할 수 있었다. SEM을 이용한 표면 조도 관찰을 통해 이러한 접촉각의 변화가 후처리에 의한 표면의 결 구조의 제거에 기인한 것임을 확인하였다. 광경화식 프린트물은 적층식 대비 친수성의 특성을 보였으나 소수성 코팅을 이용해 표면 개질이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 두 프린팅 방식 중 투명한 재질이 요구되는 경우, 적층 방식은 투명한 시편을 만드는 것이 불가능함을 확인하였으며 광경화 방식의 경우 충분한 투명도가 확보됨을 확인하였다. 액적 접촉충전 현상에 기반한 디지털 전기천공 시스템의 electroporation chip을 광경화 방식으로 제작하였으며 성공적으로 전기천공을 시연함으로써 미세유체 시스템에 직접 적용이 가능함 또한 확인하였다.

Abstract – In this study, basic research was conducted to provide guidelines for selecting printers and materials suitable for each application case by analyzing 3D printing method and surface characteristics of materials suitable for microfluidic system. We have studied the surface characteristics according to the materials for the two typical printing methods: The most commonly used method of Fused Deposition Modeling (FDM) printing and the relatively high resolution method of Stereolithography (SLA) printing. The FDM prints exhibited hydrophilic properties before post-treatment, regardless of the material, but showed hydrophobic properties after post-treatment with acetone vapor. It was confirmed by the observation of surface roughness using SEM that the change of the contact angle was due to the removal of the surface structure by post-treatment. SLA prints exhibited hydrophilic properties compared to FDM prints, but they were experimentally confirmed to be capable of surface modification using hydrophobic coatings. It was confirmed that it is impossible to make a transparent specimen in the FDM method. However, sufficient transparency is secured in the case of the SLA method. It is also confirmed that the electroporation chip of the digital electroporation system based on the droplet contact charging phenomenon was fabricated by the SLA method and the direct application to the microfluidic system by demonstrating the electroporation successfully.

Key words: 3D printing, Microfluidics, Contact angle, Surface roughness, Transparency

[†]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

빅데이터와 인공지능, 로봇공학, 사물인터넷, 무인기, 3D 프린팅, 나노 기술 등 새로운 혁신 기술들로 대변되는 4차 산업혁명은 정보통신 기술의 융합으로 이루어낸 새로운 형태의 산업 패러다임이다 [1]. 3차 산업혁명으로 불리는 지금의 정보화 시대가 현실 공간의 정보를 사이버 공간 상의 정보로 전환하는 정보화 과정에 집중했다면 4차 산업혁명은 그 반대로 사이버 공간 상의 정보를 실제 현실에 구현하는 데 집중하며 두 공간의 상호 작용을 촉진하는 것으로 이해될 수 있으며 대표적인 예로 증강현실과 3D 프린터가 있다. 이러한 의미에서 사이버 공간 상의 정보를 이용해 실제 현실에 실물을 제작하는 역할을 하는 3D 프린팅 기술은 4차 산업혁명에 있어 핵심적인 역할을 하는 기술이다[2]. 현재 3D 프린팅 기술은 제품의 초기 디자인 평가 및 시제품 제작을 넘어 실제 기계, 건설 등 산업 현장에서 제품을 생산하는 수준에 까지 이를 정도로 다양한 분야에서 폭 넓게 상용화가 진행 되고 있다[3-5]. 특히 바이오 및 화학 분야에서도 미세유체 시스템을 중심으로 3D 프린팅 기술 적용에 대한 관심과 연구가 활발히 진행 중이다[4-8].

현재의 미세유체 시스템 제작은 대부분 반도체 공정에 사용되는 리소그래피 기술에 기반하고 있으며 이러한 이유로 높은 제작 비용과 디자인 변경에의 제한 등 많은 한계가 있다[7]. 또한 이러한 한계는 연구 단계에서의 시간 및 비용 문제뿐만 아니라 상용화에도 큰 걸림돌이 되어 왔다. 이러한 미세유체 시스템의 제작 한계를 극복하고자 최근 많은 연구자들이 3D 프린터를 이용한 미세유체 시스템 제작 연구를 활발히 진행하고 있으며 많은 가능성들을 발견하고 있다[6,7]. 하지만 지금까지의 개별적인 연구들은 주로 기존에 사용하던 미세유체 시스템을 3D 프린터를 이용해 제작, 시연하여 그 활용 가능성을 보이는데 중점을 두었다. 또한 대부분의 리뷰 논문들은 3D 프린팅 방식에 따른 작동 원리를 소개하고 각각의 방식들의 장단점들을 제작된 시스템의 제작 공차 및 제작의 수월성 등의 관점에서 비교하고 정리한 내용들이 대부분이다[7-11]. 미세유체 시스템은 단위 부피당 표면적이 매우 크기 때문에 표면의 영향이 매우 지배적인 시스템이다. 따라서 제작된 미세유체 시스템의 표면 특성이 그 어떤 분야보다 중요한 역할을 하며 이러한 표면 특성들은 3D 프린팅 소재와 제작 방식에 따라 크게 달라지게 된다. 또한 3D 프린팅 제품은 일반적으로 후처리 과정을 거치게 되며 이러한 후처리 과정은 다시 표면 특성에 큰 변화를 주게 된다. 하지만 지금까지의 미세유체 관련 3D 프린팅 연구들은 제작 방식과 소재에 따른 표면 특성 등에 관련한 체계적인 연구가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 프린팅 방식, 소재 및 후처리 여부에 따른 표면특성 비교를 통해 미세유체 시스템 제작에 3D 프린터를 이용할 때 각 응용 분야에 적합한 프린팅 방식 및 소재 선정에 대한 가이드라인을 제시할 수 있는 기초 연구를 수행하였다. 다양한 3D 프린팅 방식 중 현재 가장 보편적으로 많이 사용되는 방식인 적층(Fused Deposition Modeling, FDM) 프린팅 방식과 광경화(Stereolithography, SLA) 프린팅 방식을 사용하여 프린팅 방식과 소재에 따른 접촉각 및 표면 조도 변화를 비교하였으며 3D 프린팅 된 표면의 후처리 전후 표면 특성의 변화 역시 비교하였다. 투명 소재를 이용해 두 프린팅 방식 중 어떤 방식과 소재가 투명도를 요구하는 분야에 적합한지 역시 살펴보았다. 마지막으로 액적 접촉충진 현상[12-16] 기반한 디지털 전기천공 시스템의[17-23] 미세유체 칩 제작에 적합한

프린팅 방식 및 소재를 선정하여 직접 칩을 제작, 시연함으로써 실제 미세유체 시스템에의 적용 가능성 또한 살펴보았다.

2. 실험

2-1. 실험 장치

3D 프린팅 방식에는 다양한 방식들이 존재하지만 현재 상용화되어 널리 쓰이고 있는 방식은 크게 열가소성 고분자 소재를 필라멘트 형태로 공급하여 용융 후 압출하여 적층하는 FDM [4] 방식과 광 경화성 레진을 레이저를 통해 경화 시키는 SLA [9] 방식이 있다. 본 연구에서는 이 두 가지 방식을 채택한 3D 프린터를 이용해 프린팅 방식에 따른 표면 특성 연구를 수행하였다.

현재 가장 보편적으로 많이 사용되는 대표적인 3D 프린팅 방식은 Fig. 1 좌측에 나타나 있는 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식이다. 열가소성 소재를 압출하고 층별로 쌓아 3D 형상을 생성하는 방식으로 작동 원리가 비교적 단순하고 명확하여 프린팅 기계 및 소재의 가격 경쟁력이 여타의 방식보다 매우 뛰어나기 때문에 현재 가장 많이 보급된 3D 프린팅 방식이다. FDM 방식의 또 다른 장점은 여러 종류의 재료를 동시에 사용하여 보다 복잡한 프린트물을 제작할 수 있다는 점이다. 본 연구에서는 여러 FDM 방식의 프린터 중 Ultimaker사의 Ultimaker 3를 사용하였다.

Fig. 1 우측에 나타난 바와 같이 UV 광선을 사용해 재료를 경화하여 한 층씩 쌓는 방식인 SLA (Stereolithography) 방식은 FDM 방식 대비 프린팅 기계 및 소재의 가격 경쟁력이나 다양성 측면에서 불리하나 해상도가 상대적으로 좋다는 장점이 있는 방식이다. 본 연구에서는 여러 SLA 방식의 프린터 중 Formlabs사의 Form 2를 사용하였다.

FDM 방식의 3D 프린트물에 대한 후처리의 경우, 아세톤 증기를 사용하여 후처리 하는 것이 일반적이며 후처리를 위한 전용 기기를 사용하는 경우가 많다. 본 연구에서는 후처리 전용 기계(BBOSHASI 250)를 사용하여 FDM 방식의 3D 프린트물에 대한 후처리를 진행하였다. 일반적으로 SLA 프린팅 후 잔류되어 있는 레진을 IPA (Isopropyl alcohol)를 이용해 세척하는 과정을 거치지만 별도의 후처리 과정을 거치지 않는다.

2-2. 실험 재료

FDM 프린팅 방식에 사용되는 필라멘트 재료는 PLA (Polylactic acid)가 가장 보편적으로 사용된다[8]. 본 연구에서는 PLA 외에 CPE (Copolyester), 친환경소재로 ABS, PLA 단점을 보완하여 높은

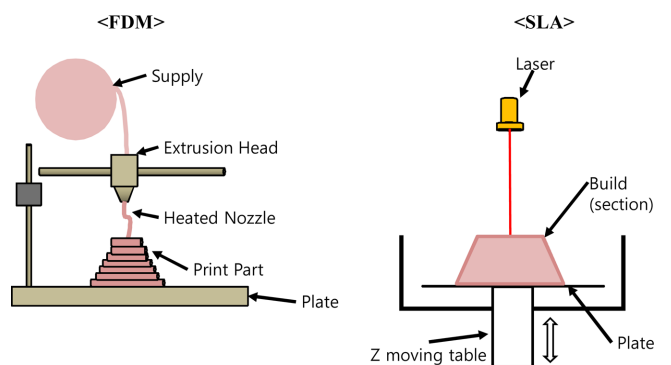


Fig. 1. Operational principles of 3D printing machines.

강도를 가지며 우수한 광투과성을 지닌 PETG (glycolmodified polyethylene terephthalate), 그리고 CPE와 유사한 재료를 사용하나 강도와 출력안정성이 높고 출력속도가 빠른 nGen 이란 CPE 계열 소재를 사용하여 각각의 표면 특성을 살펴 보았다. SLA 방식에 사용되는 광 경화성 레진은 Epoxy 또는 Acrylate 기반의 proprietary photoinitiators를 포함한 재료들[4] 사용하였으며 Formlabs사에서 제공하는 투명색의 레진을 사용하여 표면 특성을 살펴 보았다. FDM 방식의 3D 프린트물에 대한 후처리에는 아세톤이 포함되어 있는 BBOSHASI 전용 시약을 사용하였으며 SLA 방식의 레진 세척에는 IPA를 사용하였다.

2-3. 실험 방법

3D 프린팅 방식 및 소재에 따른 표면특성 측정을 위해 폭 20 mm, 길이 70 mm, 두께 3 mm의 슬라이드글라스 모양의 직사각형 평판 시편을 각각의 소재 및 프린팅 방식에 따라 동일하게 제작하였다. 3D 프린팅 출력에 소요된 시간은 FDM 방식은 2시간 17분, SLA 방식은 1시간 43분이 소요되었다. 모든 프린트물은 동일한 규격으로 동시에 2개를 출력하여 하나는 후처리를 하지 않고 또 다른 하나는 후처리를 하여 표면특성 측정을 진행하였다. FDM 방식의 후처리는 전용 후처리 장치와 전용 후처리 용액을 사용하여 5분간 진행하였다. 후처리 용액은 아세톤을 포함한 용액으로 아세톤은 프린트물의 외부층과 화학적으로 반응하여 중합체 체인의 표면 결합을 약화시켜 분자가 서로 미끄러지면서 보다 안정된 위치로 이동하게 유도함으로써 표면을 매끄럽게 처리하게 된다[24]. 이는 일반적으로 세척을 목적으로 고분자 표면에 사용되는 알코올류의 세척제와는 구분되는 용액이다.

접촉각 측정은 각각의 출력물 위에 2 mL 크기의 물방울을 올려 사진 촬영을 한 뒤 이미지 처리 프로그램(Image J)을 사용하여 측정하였다. 접촉각 측정을 위해 출력물은 광학테이블에 배치된 스테

이지에 고정시켰으며 사진 촬영을 위한 카메라(캐논 EOS 100D) 역시 스테이지에 고정시켜 초점을 조정하였다. 물방울의 형상을 선명하게 촬영하기 위해 LED 조명을 사용하였으며 역광으로 촬영하여 Fig. 2a와 같은 사진을 얻었다.

3D 프린팅 표면의 특성 상 한쪽 방향으로 결이 생성되기 때문에 접촉각 측정을 크게 출력물의 결 방향에 수직인 방향과 수평 한 방향으로 각각 측정하였다. 출력물의 표면 위치에 따른 표면특성 편차를 고려하기 위해 수직과 수평 방향 각각에 대해 서로 다른 5개의 지점에 물방울을 올려 사진을 촬영하였다. 촬영된 사진은 확대 후 물방울의 좌, 우 접촉면에 대해 각 3회씩 접촉각을 측정하였다.

표면조도는 Fig. 2b에 나타난 바와 같이 SEM 이미지를 통해 확인하였으며 후처리 전과 후에 접촉각의 변화가 가장 컸던 FDM 방식의 PLA와 SLA 방식의 투명 레진에 대해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. FDM 방식의 소재 별 접촉각 비교

FDM 프린팅 방식의 소재 별 접촉각의 후처리 전후의 변화는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. 후처리 전 접촉각의 경우 PETG가 가장 높은 평균 접촉각(89.4°)을 나타냈으며 PLA (85.6°), CPE (83.6°), nGen (70.84°) 순으로 평균 접촉각을 나타냈다. 필라멘트의 소재가 모두 플라스틱 임에도 모두 90도 보다 낮은 평균 접촉각을 나타내었으며 접촉각의 편차가 매우 크게 나타났다. 특히 PETG의 경우 최대 접촉각이 123° 인데 반해 최소 접촉각이 63°로 나타나는 등 가장 큰 접촉각의 편차를 나타내었다. 전체적으로 프린트된 면의 결의 수직 방향 접촉각이 수평방향 접촉각보다 크게 나타났다. 후처리 전의 프린트 면들이 높은 접촉각 편차를 보이는 원인으로 Fig. 2b에 나타난 바와 같이 필라멘트가 적층되면서 생성된 표면의 결 구조가 한 원인으로 파악되며 프린트 면의 위치에 따른 표면 상태의 큰 편차 역시 높은 접촉각 편차의 원인으로 분석된다.

후처리를 통해 표면 상태의 편차를 줄일 경우 접촉각의 변화를 측정할 결과는 이러한 가설을 부분적으로 뒷받침 한다. Fig. 3 우측에 나타난 바와 같이 후처리 후 접촉각의 평균값은 전체적으로 높아져 103.7°~88.4°의 범위를 나타냈다. 하지만 각 소재별 접촉각의 변화는 매우 다른 양상으로 나타나 접촉각 평균값은 PLA (103.7°)가 가장 높게 나타났으며 nGen (101°), CPE (90.7°), PETG (88.4°)로 나타나는 등 소재별로 큰 차이를 보였다. 특히 PETG의 경우 후처리 전보다 접촉각의 편차는 많이 줄어들었으나(최대 97.9°, 최소 80.5°) 평균 접촉각은 거의 변화가 없어서 결과적으로 네 가지 소재 중 후처리 후 가장 낮은 평균 접촉각을 나타냈다. 네 가지 소재 중 후처리 후 접촉각의 향상이 가장 두드러진 소재는 nGen으로 평균 접촉각이 30° 이상 증가하였으며 접촉각 편차 역시 크게 감소하였다(최대 126.9°, 최소 84.3°). 하지만 CPE와 PLA의 경우 후처리 후 오히려 접촉각의 편차가 증가하였으며 CPE의 경우 평균값의 증가 역시(83.6° → 90.7°) 미미한 수준으로 변화되었다. PLA의 경우 18° 가량의(85.6° → 103.7°) 접촉각 증가가 있었으나 편차가 오히려 증가하는 결과를 나타냈다(최대 109.9°, 최소 68.2° → 최대 130.3°, 최소 78.7°).

3-2. FDM 방식의 후처리 전후 표면조도 비교

앞서 얻어진 후처리 전후 접촉각의 변화 등을 설명하고 표면의

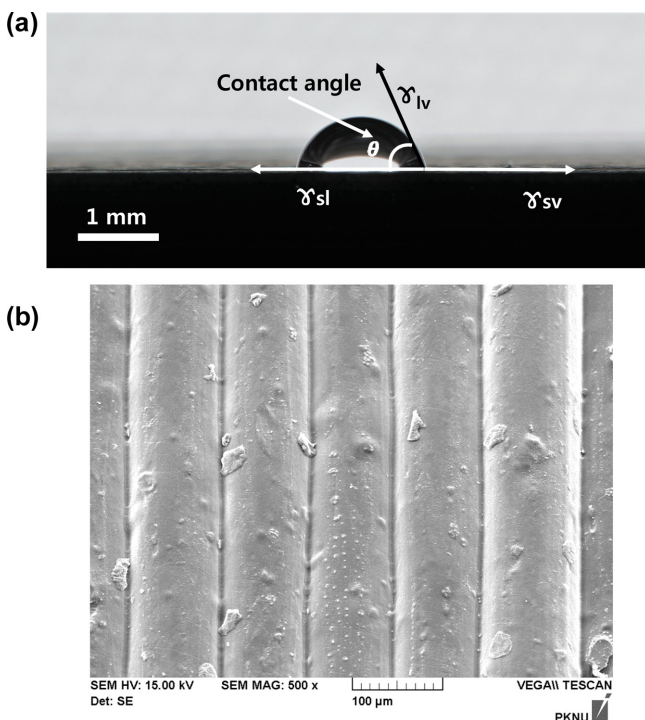


Fig. 2. (a) Contact angle measurement of PLA surface, (b) Surface roughness measurement by the SEM image of PLA surface.

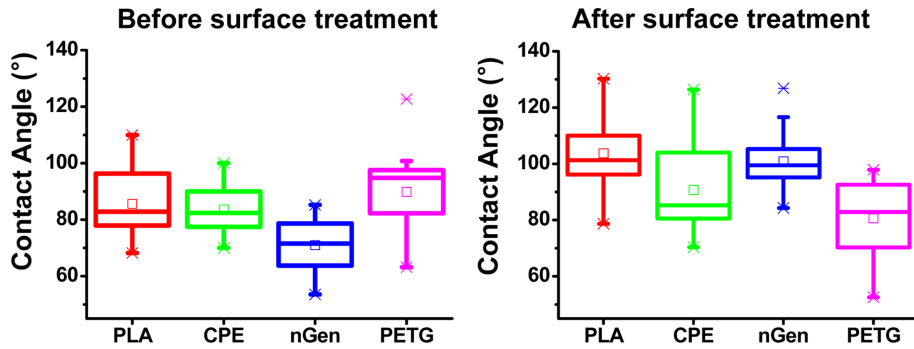


Fig. 3. Comparison of contact angles of FDM materials before and after surface treatment.

미세 구조 등을 살펴보기 위해 SEM 이미지를 통해 표면조도를 확인해 보았다. 네 가지 소재 중 후처리 전후 접촉각의 변화가 크게 나타났고 가장 널리 사용되는 소재인 PLA를 대표 소재로 선정하여 후처리 전후 표면의 미세 구조 변화를 살펴보았다.

후처리 전 프린트물의 표면을 살펴보면 Fig. 4 좌측 상단에 나타난 바와 같이 표면에 광택이 없고 미세한 결 구조가 있음을 확인할 수 있었다. SEM 이미지를 통해 이러한 표면의 미세 결 구조가 FDM 프린팅 중 필라멘트의 적층 과정에서 생긴 구조 때문임을 Fig. 4 좌측 하단의 SEM 이미지를 통해 확인할 수 있었다. 결 구조의 두께는 대략 수 십 마이크로미터 정도로 일반적으로 FDM 방식의 프린터가 가지는 해상도와 일치함을 확인할 수 있다.

이러한 미세 구조는 아세톤 증기를 이용해 표면 처리를 통하면 사라지는 것을 Fig. 4 우측 SEM 이미지를 통해 확인할 수 있었다. 후처리를 한 표면은 육안으로 관찰했을 때 표면에 광택이 나타났으

며 기존에 보이던 미세 결 구조가 더 이상 관찰되지 않음을 확인할 수 있었다. 다른 FDM 소재에 대해 SEM 이미지를 확인해 보지는 않았으나 후처리 후 표면에서 보이는 특징(표면 광택 및 미세 결 구조의 사라짐) CPE, PETG, Ngen에서 모두 동일하게 나타났으며 PLA와 동일한 이유로 이러한 특징이 나타남을 유추할 수 있다.

표면 광택과 미세구조의 변화로부터 후처리 전후 접촉각 변화의 주된 원인으로 표면의 결 구조 변화가 있음을 확인하였다. 하지만 FDM 방식에 기인한 결 구조 못지 않게 표면의 균일도 역시 접촉각에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 왜냐하면 Fig. 3 우측에 나타난 바와 같이 후처리 후 표면 결 구조가 사라짐에도 불구하고 여전히 높은 접촉각의 편차를 보이는 것은 단순히 표면의 결 구조로만 설명하기는 무리가 있기 때문이다. 즉, FDM 방식의 프린트물은 후처리 후 표면 결 구조가 사라지며 접촉각의 증가와 일부 편차의 감소가 나타나지만 이러한 변화 못지 않게 표면의 균일도 역시 접

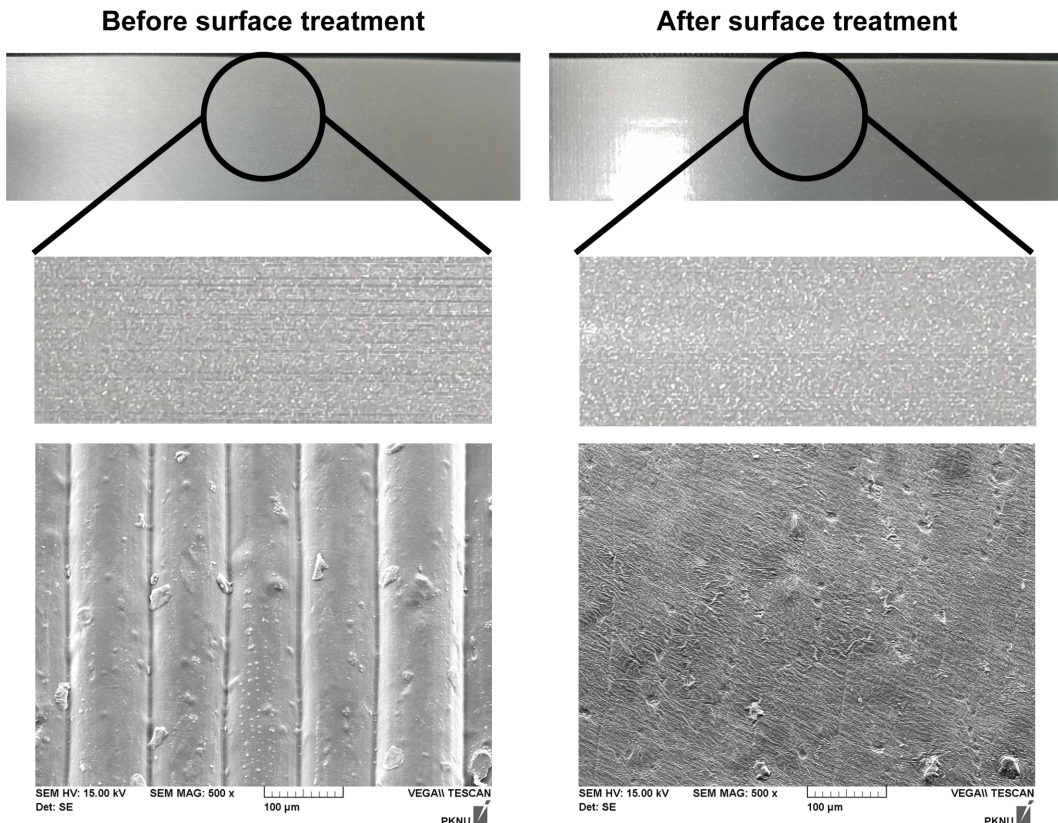


Fig. 4. The surface photograph (top and middle) and SEM images of PLA (bottom) before and after surface treatment by acetone vapor.

촉각에 큰 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다.

후처리 후에도 크게 나타나는 접촉각의 편차는 Fig. 4 우측 하단 SEM 이미지에 나타난 바와 같이 표면의 불규칙한 홈들과 부정형의 입자들이 들러붙어 있음으로 야기되는 표면의 불균일성에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 표면의 불균일성은 후처리 시간을 늘림으로써 다소 해소가 가능할 수 있으나 후처리 시간을 늘리면 원형이 변형될 위험이 있어, 표면을 녹여서 미세 결 구조를 없애면서도 표면 상태를 고르게 할 수 있는 방법에 대한 추가 연구가 필요해 보인다. 특히 소재에 따라 후처리 후 다른 접촉각의 변화 양상을 나타내는 것은 동일한 후처리 시간 5분을 적용한 영향으로 판단되며 각 소재에 적합한 후처리 시간 및 방법을 적용하면 보다 균일한 표면조도를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

3-3. SLA 프린팅 방식의 접촉각과 표면조도

SLA 방식의 경우 소재의 선정이 사용 기기에 종속되어 있어 다양한 소재를 이용하는데 제약이 따른다. 본 연구에서 사용한 SLA 프린터의 경우, 동일한 소재에 색깔에 따른 차이만 존재할 뿐 소재의 종류를 별도로 선택할 수 없어 본 연구에서는 투명 레진만을 사용하여 표면 특성을 살펴보았다. 색상 차이에 따른 표면 특성 변화는 거의 나타나지 않았기 때문에 투명 레진을 이용한 실험 결과는 다른 색상에도 크게 다르지 않게 적용이 가능할 것으로 판단된다.

SLA 방식으로 출력한 3D 프린트물의 경우 Fig. 5a에 나타난 바와 같이 접촉각은 FDM 방식의 소재 대비 낮은 평균 접촉각을 (73.1°) 나타냈으나 접촉각의 편차는 상대적으로 작은 편이었다(최대 83.7° , 최소 62.7°). 이러한 특성은 FDM 대비 상대적으로 균일한 표면조도에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 5b 위쪽에 나타난 바와 같이 SLA 프린트물의 경우 표면이 매우 매끄럽고 부드러운 촉감을 나타내어 표면에 결 구조가 보였던 FDM 프린트물 대비 평평하고 매끄러운 표면 특성을 보였다. 이러한 특징은 Fig. 5b 아래 나타난 SEM 이미지에 보이는 것과 같은 균일한 표면 구조에 기인한 것으로 별도의 표면처리를 하지 않은 것을 감안하면 비교적 균일한 표면 미세 구조를 가짐을 확인할 수 있었다. 하지만 미세구조 사이 사이에 일종의 결과 유사한 구조가 존재하여 육안으로 관찰했을 때 아주 희미지만 미세한 결 구조를 확인할 수 있었다. 이는 레이저를 이용한 경화 과정에서 순차적으로 경화가 되는 도중에 생기는 규칙적인 굴곡이 원인인 것으로 판단된다.

FDM 방식에서 이러한 미세 결 구조를 후처리를 통해 제거할 수 있었던 것을 감안하여 SLA 방식의 프린트물을 후처리 할 수 있는 방법을 모색해 보았으나 일반적으로 잔여 레진을 IPA를 이용해 세척하는 과정 이외에 별도의 후처리 방식은 알려진 바가 없었다. 이에 본 연구에서는 아세톤 용액에 SLA 프린트물을 24시간 담근 후 표면의 변화를 살펴 보았으나 별 다른 변화는 발견하지 못해 별도의 후처리는 할 수 없었다.

SLA 방식의 3D 프린트물은 일반적으로 FDM 방식의 프린트물 대비 높은 해상도를 보이는 것이 장점이며 이러한 높은 해상도는 Fig. 5b에 나타난 SEM 이미지로도 확인이 가능했다. 따라서 SLA 방식의 이러한 높은 해상도는 미세유체 시스템 제작에 FDM 방식 대비 높은 경쟁력이 될 수 있다. 하지만 SLA 프린트물의 경우 FDM 대비 낮은 접촉각을 보이는 특징으로 인해 소수성 표면을 요구하는 미세유체 시스템에는 적합하지 않은 방식일 수 있다. 또한 FDM 방식의 경우 후처리를 통해 SLA보다 균일하고 매끄러운 표

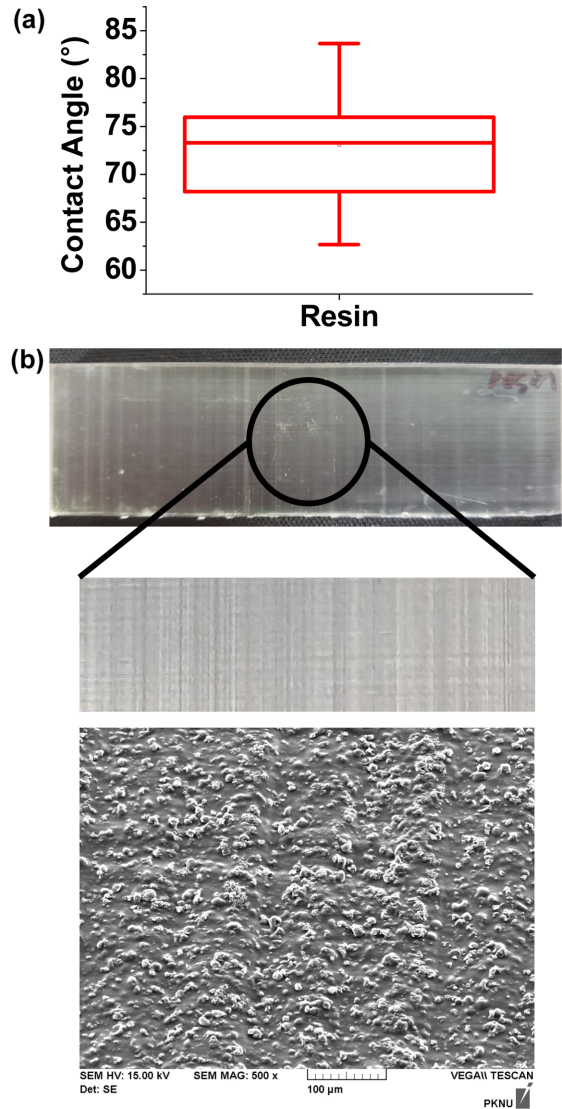


Fig. 5. Surface properties of SLA resin (a) Contact angle (b) Surface photograph (top and middle) and SEM image (bottom).

면 구조를 얻는 것이 가능하기 때문에 시스템에서 요구하는 해상도를 후처리를 통해 확보 가능하다면 소수성 표면이 반드시 요구되는 미세유체 시스템에서는 FDM 방식의 프린팅도 고려해 볼 수 있다.

3-4. FDM 방식과 SLA 방식의 투명도 비교

미세유체 시스템의 경우 관찰의 용의성을 위해 투명한 소재를 사용하는 경우가 대부분이다. 특히 Optofluidics 분야와 같이 반드시 투명 소재를 요구하는 경우도 많기 때문에 소재의 투명도는 미세유체 시스템 제작에 있어 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이에 본 연구에서는 각 프린팅 방식에서 제공되는 투명 소재들을 직접 제작하여 투명도를 확인해 보았다.

FDM 방식의 경우 CPE, nGen, PETG, PLA 소재가 투명한 소재로 제공되고 있어 세 가지 소재를 이용하였으며 SLA 소재는 투명 레진을 사용하여 시편을 제작하였다. 제작 시편은 앞선 표면 특성 분석에 사용되었던 시편과 동일한 크기와 모양을 가지는 슬라이드 글라스 형태의 시편을 제작하였으며 검은색 바탕에 ‘Transparency’란 글자가 인쇄된 종이 위에 프린트물을 올려 놓고 사진을 찍어 바탕






(a) FDM	(b) SLA
<p>Copolyester (nGen)</p> 	
<p>PETG</p> 	<p>Resin</p> 
<p>CPE</p> 	
<p>PLA</p> 	

Fig. 6. Transparency of materials for (a) FDM method and (b) SLA method.

글자의 비침 정도로 투명도를 확인하였다.

FDM 방식의 소재는 출력전의 필라멘트는 모두 투명한 상태였으나 출력 후에는 Fig. 6a에 나타난 바와 같이 모든 소재가 투명도를 기대하기 어려웠다. 특히 nGen의 경우는 거의 불투명한 흰색에 가까운 색상을 나타내어 바탕에 있는 글자를 식별하는 것이 불가능했다. 이러한 불투명성은 후처리를 해도 개선되지 않았으며 이는 적층 과정에서 생긴 결 구조가 빛을 불규칙적으로 산란시키는 역할을 해서 생기는 문제로 FDM 방식의 근본적인 한계로 판단된다. 즉, 투명 소재가 요구되는 경우, FDM 프린팅 방식은 적합하지 않은 것으로 판단된다.

SLA 방식의 경우 Fig. 6b에 나타난 바와 같이 출력물을 통해 바탕의 글자를 선명하게 알아볼 수 있을 정도로 투명한 것을 확인하였다. SLA 방식 역시 FDM에서 나타난 것과 유사한 미세 결 구조가 관찰되기는 하였으나 높은 해상도 덕분에 빛의 산란 정도가 투명도를 크게 낮출 만큼의 영향은 없는 것으로 판단된다. 따라서 투명도가 요구되는 미세유체 시스템 제작에는 SLA 방식의 투명 레진을 사용해 제작해야 함을 확인할 수 있었다.

3-5. Electroporation Chip 제작을 위한 소재 선정 및 시연

디지털 전기천공에[17-19] 사용되는 electroporation chip을 제작하기 위해서는 칩의 제작 소재가 투명해야 하며 생물 실험에 사용해야 하기 때문에 IPA나 아세톤에 대한 내화학성이 있어야 하고 액적이 표면에 들러붙지 않도록 소수성의 표면 특성을 가져야 한다. 앞서 수행한 프린팅 방식과 소재 별 특성들을 고려할 때 electroporation chip 제작에는 SLA 방식의 투명 레진을 사용하는 것이 적합하다는

결론을 얻을 수 있었다. SLA 방식의 경우 충분히 높은 해상도를 가지고 있기 때문에 칩 제작에는 큰 어려움이 없으나 반복되는 IPA나 아세톤 세척에 따른 내화학성을 추가로 확인하는 것이 필요하며 액적이 칩 표면에 들러붙지 않게 하기 위한 소수성 표면이 추가로 요구된다.

IPA나 아세톤 세척에 따른 내화학성 특성을 확인하기 위해 프린팅 된 시편을 IPA와 아세톤 용액에 각각 24시간 보관 후 표면의 상태 변화를 확인하였다. 만 하루 동안에 용액에 담겨 있었음에도 불구하고 육안으로 확인되는 변화는 관찰되지 않아 IPA와 아세톤에 충분한 내화학성을 가짐을 알 수 있었다. FDM 방식 대비 낮은 접착각을 보여 친수성에 가까운 표면 특성을 지닌 SLA 레진 표면에 소수성 코팅을 이용해 소수성 표면 특성을 지닐 수 있는지 확인하는 실험을 추가로 진행하였다. 소수성 코팅은 시판되는 코팅 약품을 (RUST-OLEUM사의 Never Wet multipurpose kit) 사용하였다. 시편의 표면에 베이스 코팅제를 얇게 도포하여 30분 건조한 후, 탑 코팅제를 얇게 도포하여 30분 건조하는 과정으로 진행하였다. Fig. 7a에 나타난 바와 같이 코팅 후 SLA 프린팅 표면이 매우 큰 소수성을 나타냄을 확인할 수 있었으며 실제 제작된 칩 내부에 소수성 코팅을 하여 시연을 진행하였다. FDM 방식의 프린팅 표면 역시 충분한 소수성을 띠지 않을 시 같은 코팅 방식을 적용하여 소수성을 띠게 함으로써 표면 특성을 보완할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 이러한 소수성 코팅제의 경우, 시간이 지나면서 코팅의 효능이 감소하기 때문에 보다 근본적으로는 소재 자체의 소수성을 확보하는 것이 더 바람직한 방향이다.

SLA 3D 프린팅을 통해 제작된 electroporation chip이 Fig. 7b에

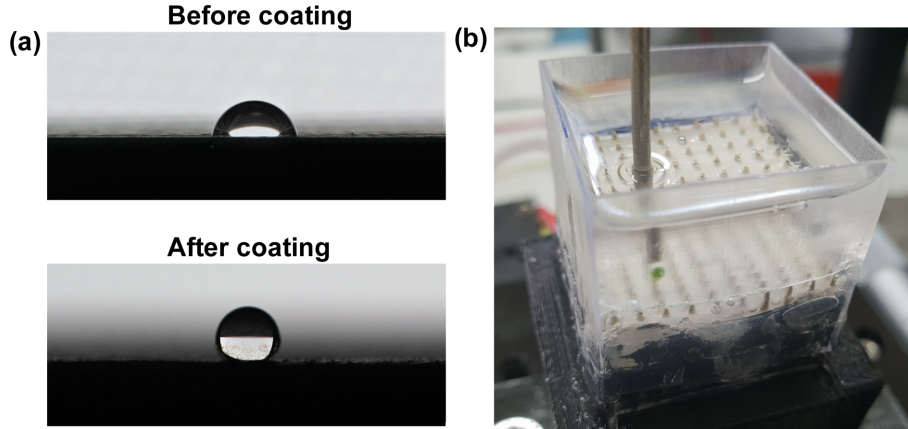


Fig. 7. (a) Contact angle change after the hydrophobic coating on SLA printing surface, (b) 3D printed electroporation chip and its demonstration.

나타나 있다. 본 연구에서는 기존에 아크릴로 주문 제작하던 외부 투명 케이싱 부분을 3D 프린터를 이용해 제작하여 핀헤더로 제작된 전극 어셈블리를 끼워 넣는 형태로 제작하였다. 전극 어셈블리와 3D 프린팅 된 외부 투명 케이싱 사이에 틈이 생기면 채워놓은 오일이 쉐 수 있기 때문에 미세한 공차 조정을 여러 번의 시행착오 끝에 최적화 하여 오일의 누유를 방지할 수 있는 최적의 크기(가로 : 27 mm, 세로 : 27 mm, 높이 : 20 mm)를 찾아 제작하였다. 이러한 작업은 이전 주문 제작 아크릴에서는 불가능 했던 것으로 디자인의 미세한 변경 등 실제 상품제작 시 발생할 수 있는 공차 문제 등을 3D 프린터를 이용하면 쉽게 해결할 수 있음을 이 연구를 통해 확인할 수 있었다. 외부 투명 케이싱의 두께 역시 초기에는 시편과 같은 두께인 3 mm를 사용하였으나 충분한 투명도 확보가 어려워 두께를 0.5 mm로 조정하여 제작한 결과 Fig. 7b에 보이는 바와 같이 실험에 사용 가능한 투명도를 확보할 수 있었다. 이렇게 제작된 칩은 실제 electroporation 실험에 사용할 수 있었으며 기존 대비 제작에 소요되는 시간과 비용을 크게 줄일 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 미세유체 시스템 제작에 적합한 3D 프린팅 방식 및 소재 별 표면특성 분석을 통해 각 응용 사례에 적합한 프린터 및 소재 선정에 가이드라인을 주고자 기초 연구를 수행하였다. 여러 3D 프린팅 방식 중 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되는 FDM 방식과 해상도가 상대적으로 높은 SLA 방식에 대해 프린팅 방식과 소재에 따른 표면 특성을 살펴보았다. FDM 방식의 프린트 물의 경우 후처리 전 약 60~80°의 접촉각을 나타냈으며 아세톤 증기를 이용한 후처리 후에는 대부분 90° 이상의 접촉각을 가져 접촉각이 향상됨을 확인할 수 있었다. SEM을 이용한 표면 조도 관찰을 통해 이러한 접촉각의 변화가 후처리에 의한 표면의 결 구조의 제거에 기인한 것임을 확인하였다. 즉, FDM 방식의 프린트물은 소재에 무관하게 후처리 전에는 친수성 특성을 보이거나 아세톤 증기에 의한 후처리 후에는 소수성 특성을 보임을 확인할 수 있었다. 이는 일반적으로 소수성 소재의 경우 후처리를 하여 표면이 매끈해 질수록 접촉각이 증가하는 경향을 나타내어 표면의 소수성이 높아지는 것으로 설명될 수 있다[25]. FDM 방식의 프린트물들은 후처리 전 접촉각의 편차가 매우 크게 나타나 표면의 균일도가 비교적 낮음을

확인하였으며 후처리를 통해 이러한 불균일 정도를 감소시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 하지만 일부 소재에서는(CPE) 오히려 접촉각의 편차가 후처리 후 증가하는 경향을 나타내었으며 이는 후처리에 따른 표면 변화가 각 소재 별로 다르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 FDM 방식 프린트물의 후처리 시간 및 후처리 시약의 농도에 대해 각 소재 별로 최적화하는 과정이 필요하며 이를 통해 보다 균일한 표면특성을 보이는 프린트물 제작이 가능함을 보여 준다고 할 수 있다.

SLA 방식의 프린트물은 70~75° 접촉각을 가져 FDM 대비 친수성의 특성을 보였다. SLA 방식은 별도의 후처리 과정이 없어 소수성 표면 특성을 나타나게 하기 위해 소수성 코팅을 이용해 매우 큰 접촉각을 보이는 소수성의 표면 개질이 가능함을 실험적으로 확인하였다. 두 프린팅 방식 중 투명한 재질을 요구하는 경우, FDM 방식은 현실적으로 투명한 시편을 만드는 것이 불가능함을 확인하였으며 SLA 방식의 경우 비교적 두꺼운 시편을 제작하여도 충분한 투명도가 확보됨을 확인하였다. 따라서 투명도가 요구되는 미세유체 시스템에는 반드시 SLA 방식의 프린터를 사용해야 함을 확인하였다. 액적 접촉충전 현상에 기반한 디지털 전기친공 시스템의 electroporation chip 제작을 SLA 방식을 활용하여 수행하였으며 성공적으로 칩을 제작, 시연함으로써 미세유체 시스템에 직접 적용이 가능함을 확인하였다.

감 사

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아(NRF-2018RID1A3B07047852) 수행되었습니다. 또한 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No. 20194010201840).

References

1. Almada-Lobo, F., "The Industry 4.0 Revolution and the Future of Manufacturing Execution Systems (MES)," *J. Innov. Manag.*, **3**(4), 16-21(2015).
2. Maynard, A. D., "Navigating the Fourth Industrial Revolution," *Nat. Nanotechnol.*, **10**(12), 1005-1011(2015).
3. Duballet, R., Baverel, O. and Dirrenberger, J. "Classification of

- Building Systems for Concrete 3D Printing” *Autom. Constr.*, **83**, 247-258(2017).
4. Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C. and Spence, D. M., “Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences,” *Anal. Chem.*, **86**(7), 3240-3253(2014).
 5. Bhatia, S. N. and Ingber, D. E., “Microfluidic Organs-on-chips,” *Nat. Biotechnol.*, **32**, 760-772(2014).
 6. Rupal, B. S., Garcia, E. A. Ayranci, C. and Qureshi, A. J., “3D Printed 3D-Microfluidics: Recent Developments and Design Challenges,” *J. Interg. Design & Process Sci.*, 1-16(2018).
 7. Waheed, S., Cabot, J. M., Macdonald, N. P., Lewis, T., Guijt, R. M., Paull, B. and Breadmore, M. C., “3D Printed Microfluidic Devices: Enablers and Barriers,” *Lab Chip*, **16**(11), 1993-2013(2016).
 8. Chen, C., Mehl, B. T., Munshi, A. S., Townsend, A. D., Spence, D. M. and Martin, R. S., “3D Printed Microfluidic Devices: Fabrication, Advantages and Limitations-a Mini Review,” *Anal. Methods*, **8**(31), 6005-6012(2016).
 9. Ho, C. M., Ng, S. H., Li K. H. and Yoon, Y. H., “3D Printed Microfluidics for Biological Applications,” *Lab Chip*, **15**(18), 3627-3637(2015).
 10. Sochol, R. D., Sweet, E., Glick, C. C., Venkatesh, S., Aventisyan, A., Ekman, K. F., Raulinaitis, A., Tsai, A., Wienkers, A., Korner, K., Hanson, K., Long, A., Hightower, B. J., Slatton, G., Burnett, D. C., Massey, T. L., Iwai, K., Lee, L. P., Pister, K. S. J. and Lin, L., “3D Printed Microfluidic Circuitry Via Multijet-based Additive Manufacturing,” *Lab Chip*, **16**(4), 668-678(2016).
 11. Kitson, P. J., Rosnes, M. H., Sans, V., Dragone, V. and Cronin, L., “Configurable 3D-Printed Millifluidic and Microfluidic ‘lab on a chip’ Reactionware Devices,” *Lab Chip*, **12**(18), 3267-3271(2012).
 12. 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**(8), 5168-5174(2011).
 13. 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).
 14. 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).
 15. Choi, C. Y. and Im, D. J., “Contact Charging and Electrophoresis of a Glassy Carbon Microsphere,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(4), 568-573(2016).
 16. Yang, S. H. and Im, D. J., “Electrostatic Origins of the Positive and Negative Charging Difference in the Contact Charge Electrophoresis of a Water Droplet,” *Langmuir*, **33**(48), 13740-13748(2017).
 17. Im, D. J., Jeong, S.-N., Yoo, B. S., Kim, B., Kim, D.-P., Jeong, W.-J. and Kang, I. S., “Digital Microfluidic Approach for Efficient Electroporation with High Productivity: Transgene Expression of Microalgae without Cell Wall Removal,” *Anal. Chem.*, **87**(13), 6592-6599(2015).
 18. Im, D. J., “Delivery of Protein into Microalgae by the Digital Electroporation,” *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(1), 79-84(2018).
 19. Im, D. J. and Jeong, S.-N., “Transfection of Jurkat T cells by Droplet Electroporation,” *Biochem. Eng. J.*, **122**, 133-140(2017).
 20. Kurita, H., Takahashi, S., Asada, A., Matsuo, M., Kishikawa, K., Mizuno, A., Numano, R., “Novel Parallelized Electroporation by Electrostatic Manipulation of a Water-in-Oil Droplet as a Microreactor,” *PLOS ONE*, **10**(12), e0144254(2015).
 21. Kim, Y. H., Kwon, S. G., Bae, S. J., Park, S. J., Im, D. J., “Optimization of the Droplet Electroporation Method for Wild Type *Chlamydomonas Reinhardtii* Transformation,” *Bioelectrochemistry*, **126**, 29-37(2019).
 22. Yoo, B. S., Im, D. J., Ahn, M. M., Park, S. J., Kim, Y. H., Um, T. W., and Kang, I. S., “A Continuous Droplet Electroporation System for High Throughput Processing,” *Analyst*, **143**(23), 5785-5791(2018).
 23. Kim, Y. H. and Im, D. J., “Control of the Culture Conditions of *Chlamydomonas Reinhardtii* for Efficient Delivery of Exogenous Materials in Electroporation,” *Algal Research*, **35**, 388-394(2018).
 24. Gao, H., Kaweesa, D. V., Moore, J. and Meisel, N.A., “Investigating the Impact of Acetone Vapor Smoothing on the Strength and Elongation of Printed ABS Parts,” *JOM*, **69**(3), 580-585(2017).
 25. Prajitno, D. H., Maulana, A. and Syarif, D. G., “Effect of Surface Roughness on Contact Angle Measurement of Nanofluid on Surface of Stainless Steel 304 by Sessile Drop Method,” *J. Phys.: Conference Series*, **739**, 012029(2016).