

SLA 3D 프린팅 방식 기반의 미세 유체 시스템 제작을 위한 소수성 표면 처리 연구

허재욱 · 배서준 · 임도진[†]

국립부경대학교 화학공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
(2023년 11월 3일 접수, 2023년 11월 20일 수정본 접수, 2023년 11월 21일 채택)

A Study on Hydrophobic Surface Treatment for Microfluidic System Fabrication Based on SLA 3D Printing Method

Jae Uk Heo, Seo Jun Bae and Do Jin Im[†]

Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea
(Received 3 November 2023; Received in revised from 20 November 2023; Accepted 21 November 2023)

요 약

SLA (Stereo Lithography Apparatus) 방식은 액체 상태의 광경화성 레진(Resin)이 자외선 레이저에 닿으면 고체가 되는 원리를 활용한 3D 프린팅 방식으로 다양한 분야에서의 활용도가 증가하고 있다. 본 연구에서는 이 SLA 3D 프린팅 출력물의 표면 특성 중 소수성과 투명도를 개선하여 미세 유체 시스템의 제작에 활용하기 위한 기초 연구를 수행하였다. SLA 출력물은 소수성 코팅 방법을 이용해 표면 소수성의 특성을 개선할 수 있었으나, 소수성 코팅 방법의 종류에 따라 다양한 환경에서의 코팅 유지력은 차이를 보였다. 또한, 미세 유체 시스템의 제작에 요구되는 충분한 투명도와 소수성의 특성을 함께 확보하기 위해 선행된 연구에서 제안한 투명도 확보 방법에 소수성 코팅을 적용하여 접촉각의 변화를 비교하였다. Teflon 코팅법이 이산화 티타늄 코팅법과 비교하여 우수한 투명도의 확보가 가능하며, 다양한 환경에 노출되었을 때 높은 코팅의 유지력을 가져 미세 유체 시스템의 제작에 활용되기에 적합한 소수성 코팅법으로 제안되었다. 마지막으로 본 연구를 통해 제안된 미세 유체 시스템의 제작에 적합한 소수성 코팅 방법인 Teflon 코팅법 중 Fluoropel 800을 이용하여 디지털 미세 유체 시스템 중 하나인 액적 접촉 충전 현상(Electrophoresis of Charged Droplet, ECD) 칩을 SLA 3D 프린팅으로 제작, 액적의 조작을 성공적으로 시연함으로써 SLA 3D 프린팅 기술의 미세 유체 시스템의 제작에 활용 가능성을 확인하였다.

Abstract – The SLA (Stereolithography Apparatus) method is a type of 3D printing technique predicated on the transformation of liquid photocurable resin into a solid form through UV laser exposure, and its application is increasing in various fields. In this study, we conducted research to enhance the hydrophobicity and transparency of SLA 3D printing surfaces for microfluidic system production. The enhancement of surface hydrophobicity in SLA outputs was attainable through the application of hydrophobic coating methods, but the coating durability under different conditions varied depending on the type of hydrophobic coating. Additionally, to simultaneously achieve the required transparency and hydrophobic properties for the fabrication of microfluidic systems, we applied hydrophobic coatings to the proposed transparency enhancement method from prior research and compared the changes in contact angles. Teflon coating was proposed as a suitable hydrophobic coating method for the fabrication of microfluidic systems, given its excellent transparency and high coating durability in various environmental conditions, in comparison to titanium dioxide coating. Finally, we produced an Electrophoresis of Charged Droplet (ECD) chip, one of the digital microfluidics systems, using SLA 3D printing with the proposed Teflon coating method (Fluoropel 800). Droplet manipulation was successfully demonstrated with the fabricated chip, confirming the potential application of SLA 3D printing technology in the production of microfluidic systems.

Key words: 3D printing, Stereolithography (SLA), Hydrophobic coating, Surface properties, Microfluidic systems

[†]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

3D 프린팅 기술은 모델링 데이터를 이용하여 3차원 구조물을 제작하는 프린팅 기술이다. 3차원 구조물을 제작하는 방식 및 소재에

따라 다양한 방식으로 구분된다[1-3]. 물질 압출 방식(Fused Deposition Modeling, FDM)은 가장 대표적인 3D 프린팅 기술로 열가소성 플라스틱을 용융, 압출하여 적층함으로써 3차원 구조물을 제작한다. FDM은 프린팅 가능한 소재의 종류가 다양하며, 장비 및 소재가 경제적인 특징을 가지고 있다[4-6]. 또 다른 3D 프린팅 기술로는 광경화성 레진을 자외선 레이저를 이용하여 경화하는 광경화성 수지 조형 방식이 있다. SLA는 해상도와 정확도가 매우 높으며, 출력물의 표면 마감이 매끄러운 특징을 가지고 있다[7-9]. 각 방식의 3D 프린팅 기술이 갖는 특징은 시제품의 제작, 부품 제작, 치의학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[9-13].

최근 3D 프린팅 기술은 Computer-Aided Design (CAD) 프로그램을 활용한 높은 디자인 자유도, 간단한 제작 과정과 같은 장점들을 앞세워 기존 미세 유체 장치의 제작 기술이 가지고 있는 복잡한 제조 공정, 높은 초기 비용 등의 문제를 해결할 수 있는 대안으로써 많은 기대를 받고 있다[14-18]. 하지만, 미세 유체 장치의 제작에는 높은 해상도를 갖는 SLA 방식이 사용되는데 여전히 해결해야 할 몇 가지 문제가 남아있다. 먼저, 투명한 소재를 사용하더라도 적층 방식이 갖는 결 무늬에 의한 투명도의 저하로 인해 높은 투명도의 확보가 어렵다. 또한, 제작에 사용되는 소재 자체의 친수성 특성으로 인해 미세 유체 장치 제작 시 유체가 장치에 붙지 않게 하는 추가적인 소수성 표면처리 과정이 필수적이다[8,16].

선행된 연구에서는 미세 유체 장치의 제작에서 SLA 방식이 갖는 주요한 두가지 문제 중 투명도의 문제를 해결하였다[19]. 사포의 입도 크기를 바꾸가며 연마하고, 흡집제거제와 같은 미세한 연마제를 사용함으로써 유리와 같은 충분한 투명도를 확보할 수 있었다. 하지만, 이러한 방법으로 SLA 출력물의 표면처리를 하더라도 소수성을 갖는 표면을 확보하는 것이 어려웠으며, 추가적인 표면 처리가 필요함을 확인하였다.

본 연구에서는 소수성 코팅 방법을 이용하여 SLA 출력물의 표면 젖음성의 변화를 체계적으로 비교하여 미세 유체 장치의 제작에 활용될 표면 처리 방법의 선정에 대한 정보를 제공하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저, 다양한 소수성 코팅 방법을 SLA 출력물에 적용하여 접촉각을 이용한 표면 젖음성 뿐만 아니라 다양한 환경에서의 코팅 유지력을 평가하였다. 또한, 선행된 연구에서 제안한 투명

도 개선 방법을 이용해 표면 처리가 된 SLA 출력물에 다양한 코팅을 적용하여 표면 특성을 평가하였다. 마지막으로 이번 연구를 통해 선정된 표면 처리 방법을 적용하여 SLA 방식을 이용한 미세 유체 기술 중 액적 접촉 충전 현상 장치의 제작을 시연함으로써, 실제 미세 유체 장치의 제작에 활용 가능성을 검증하였다.

2. 실험

2-1. 실험 장치 및 재료

소수성 평가를 위한 시편 제작용 장비로는 광경화수지 조형방식(Stereo Lithography Apparatus) 프린터인 Form 3 (Formlabs)를 사용하였다. 시편은 다이메타크릴레이트와 메타크릴레이트 모노머가 혼합된 Standard resin (Formlabs)을 이용해 제작하였고, 투명도 비교를 위해 Clear 색상을 사용하였다. 출력된 시편은 후가공장비를 통해 세척(Form Wash - Formlabs), 및 경화(Form Cure - Formlabs)되었다. 실험을 위한 셋업은 광학용 테이블에 XY-Stage 등을 고정시켜 구성하였고, 시편 고정을 위한 구조물은 FDM 방식을 이용한 3D printer (Ultimaker 3)로 제작하였다. 시편의 소수성 향상을 위해 Fluorocarbon 종류의 하나인 Teflon 코팅액(Fluoropel 800, Fluoropel 1601V - Cytonix)과 이산화 티타늄 코팅을 사용하였다. 출력된 시편의 표면 연마를 위해 시편 연마기(NA-P2001 - Kobeto)에 400, 1000, 2000, 20000방 (grit)의 사포와 차량용 소프트 컴파운드로 연마하였다.

2-2. 실험 방법

SLA 3D printing 표면의 소수성 코팅 여부를 확인하기 위해 폭 20 mm, 길이 50 mm, 두께 10 mm 크기의 직육면체 모양 시편을 제작하였다. 제작된 시편에 IPA (Isopropyl alcohol)이 담긴 세척 장비에 10분씩 2번, UV를 이용한 경화 장비에 20분 간 경화하여 후처리를 하였다. 후처리가 끝난 시편에 소수성 처리를 하기 위해 Teflon 기반의 코팅제인 Fluoropel 800, Fluoropel 1601V, 이산화 티타늄 기반의 이산화 티타늄 코팅을 Dip-coating 방식으로 코팅을 수행하였다. Fluoropel 800은 코팅제에 시편을 30초간 담근 후 천천히 꺼내고, 해당 시편을 60초간 공기 중에 건조한 후 오븐에

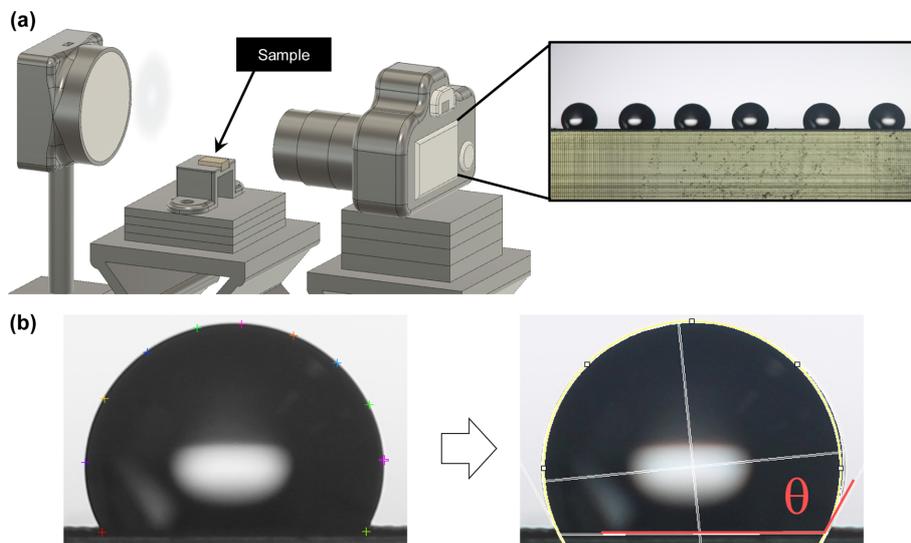


Fig. 1. (a) Schematics of experimental setup for contact angle measurement. (b) Contact angle measurement procedure.

50 °C로 10분간 가열하였다. Fluoropel 1601V는 동일하게 코팅을 진행한 후 오븐에 120 °C로 30분간 가열하였다. 이산화 티타늄 코팅을 위한 코팅액은 hexadecyltrimethylsiloxane (HTMS) (Sigma-Aldrich) 1.58 mL와 에탄올 201.6 mL 혼합액에 이산화 티타늄 나노입자(Sigma-Aldrich, <100 nm) 8.4 g을 첨가하여 제조하였다. 이산화 티타늄 나노입자가 첨가된 혼합액은 30분간 교반 한 후, 2시간 30분간 초음파 처리(sonication)하여 나노입자가 혼합액에 충분히 섞이도록 하였다[20]. 만들어진 코팅액은 빛을 차단하여 보관하였다. 이산화 티타늄 코팅은 SLA 출력물 시편을 코팅액에 2초간 담근 후 꺼내 60 °C 오븐에서 1시간 건조하였으며, 건조된 시편은 여분의 티타늄 나노입자를 제거하기 위해 초음파 세척기와 에탄올을 이용하여 5분간 세척 후 60 °C 오븐에서 15분간 건조하여 시편 세척에 사용된 에탄올을 제거하였다. 소수성 코팅이 끝난 시편은 Fig. 1(a)의 실험 셋업을 구성하여 접촉각을 측정하였다. FDM 방식의 3D printer를 통해 시편 고정용 구조물을 만들고, 시편 위에 3 mL의 물방울을 올린 뒤 카메라(캐논 EOS 100D)로 사진을 촬영하였다. 접촉각 측정은 imageJ 프로그램의 Contact angle 플러그인을 활용하였다. 이때 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이, 물방울과 시편 사이 양 끝점을 찍어 밀면으로 설정하고, 물방울에 5개의 점을 찍어 형상을 만든 후 “Manual Points Procedure” 기능을 활용하여 접촉각을 확인하였다. 시편에 코팅이 고르게 되었는지 확인하기 위해 시편 임의의 지점에 최소 6회 이상 물방울을 올려 사진을 촬영하였다. 시편의 투명도 향상을 위해 연마기에 400, 1000, 2000, 20000망(grit)의 사포를 차례대로 사용하여 연마하였으며, 연마한 시편의 투명도는 시편 밑에 ‘ABC’가 적힌 종이 보이는 정도를 이용해 정성적으로 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 소수성 코팅 방법에 따른 접촉각 평가

각각의 소수성 코팅 방법에 따른 소수성 평가를 위해 시편에 코팅을 한 후 물방울의 형태 및 접촉각의 변화를 비교하였다. 접촉각은 소수성을 평가하는 지표 중 하나로, 물질의 표면과 물방울이 이루는

각도이다. 접촉각이 90° 보다 높으면 소수성, 90° 보다 낮으면 친수성의 특성을 가지는 것으로 판단한다. Fig. 2(a)에서는 각 코팅 방법에 따른 시편의 표면 변화를 관찰하기 위해 주사전자현미경을 활용하여 코팅된 시편의 표면을 촬영하였다. 4가지 경우 모두 일정한 간격으로 일직선의 튀어나온 구조가 있는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 SLA 프린터의 적층 방식에 의해 생성된다. 관찰 결과 Teflon 코팅의 경우 코팅 후에도 출력물의 표면이 큰 변화가 없었으나 이산화 티타늄 코팅은 표면에 흰색 입자들이 다수 분포된 것을 확인할 수 있었다. 이산화 티타늄 코팅은 이산화 티타늄 입자를 용해하여 용액으로 만든 후 그것을 시편에 도포하는 형식으로 코팅이 되는데, 이 과정에서 사용된 입자들이 접촉각에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

Fig. 2(b)에서는 각각 시편의 표면에 물방울이 올라간 사진과 해당 물방울의 접촉각을 측정된 결과를 나타내었다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 별도의 처리를 하지 않은 대조군의 경우 접촉각이 87~89° 사이로 친수성을 가지고 있는 것을 알 수 있었다. Teflon 계열의 코팅인 Fluoropel 800, Fluoropel 1601V를 표면에 도포 및 건조 후 접촉각을 측정하였을 때 각각 116°, 115.5°로 약 30° 가량의 접촉각의 상승이 있었다. 사진에서도 물방울이 표면에 넓게 퍼져 있어 낮은 접촉각을 가지는 대조군과 달리 Teflon 코팅이 된 시편 표면의 물방울은 표면과의 접촉면도 적으며 높은 접촉각을 가짐을 확인할 수 있었다. 이산화 티타늄 코팅 또한 코팅 후 약 115°의 접촉각을 보이면서 Teflon 코팅과 비슷한 수준의 소수성을 확보하였으나, 이산화 티타늄 코팅의 경우 접촉각의 범위가 100°에서 118°까지 다양해 실험 간 편차가 비교적 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 앞서 Fig. 2(a)에서 예상한 것과 같이 이산화 티타늄 입자의 고르지 못한 분포가 접촉각에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3-2. 소수성 코팅 방법에 따른 유지력 평가

Fig. 2에서의 소수성 코팅 결과 모든 코팅 방법이 대조군 대비 접촉각이 증가하였고, 이로부터 코팅이 유의미하게 소수성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 하지만 미세 유체 장치는 장치 내부에 유체가 오랜 시간 동안 있거나 공기 중에 장시간 노출되는 경우가 잦

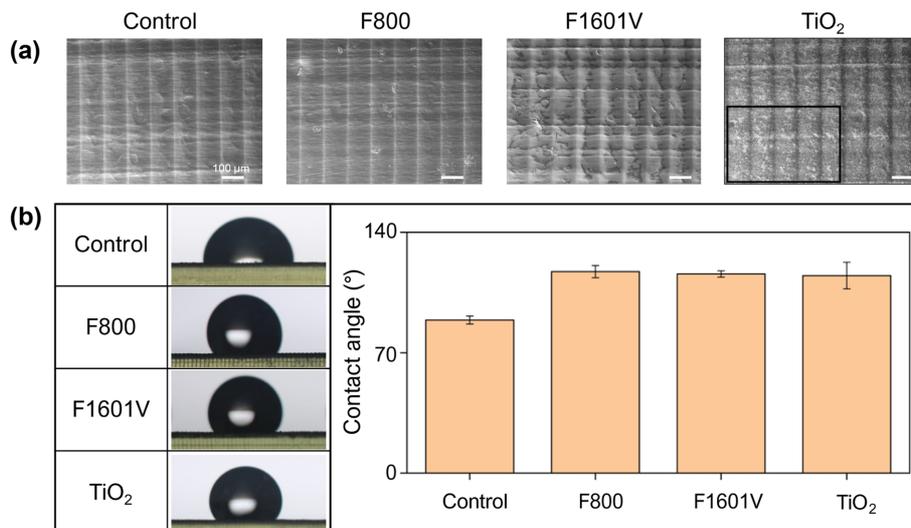


Fig. 2. Hydrophobicity measurement according to the hydrophobic coating methods. (a) A SEM image of sample surface after each coating. The magnitude of the SEM images is 300x. (b) Droplet image and graph showing contact angle difference according to the hydrophobic coating method. The size of droplets is the same at 3mL. The error bar on each bar of the graph represents the standard deviation.

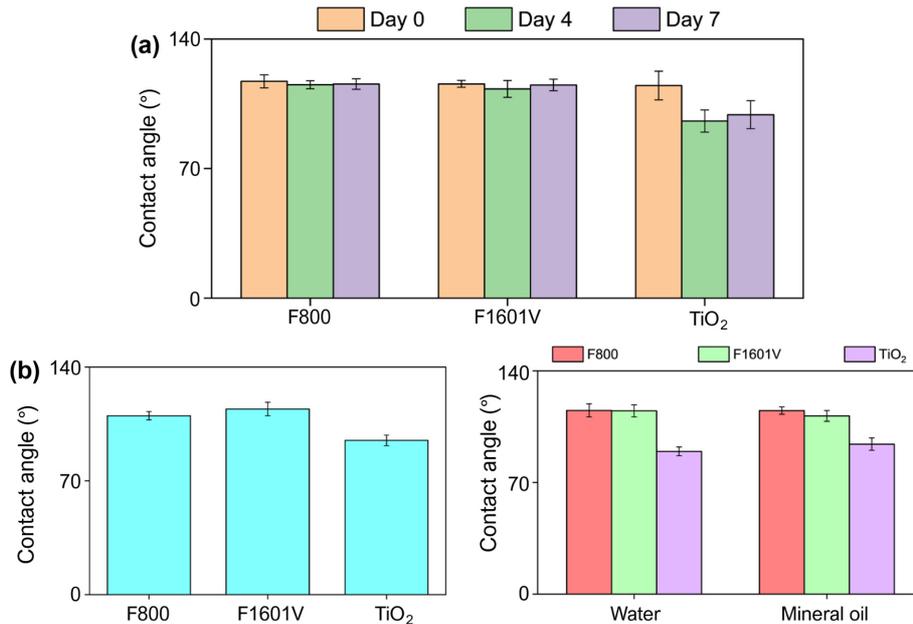


Fig. 3. Coating durability test. (a) Contact angle change in the air dependent on time, 0 day (orange), 4 days (green), and 7 days (purple). (b) Change in contact angle after 7 days of soaking in mineral oil (left) and contact angle change after mineral oil flow and water flow(right). The error bar on each bar of the graph represents the standard deviation.

기 때문에 코팅의 지속력 또한 중요하다. 때문에 실제 미세 유체 장치에 적용하기 위해 다양한 조건의 환경을 모사하여 코팅 유지력을 평가하였다. Fig. 3(a)의 경우 코팅한 시편을 Petri dish (60 × 15 mm)에 뚜껑을 제거하여 시편과 공기가 맞닿을 수 있는 상태로 7일 간 공기 중에 방치한 후 접촉각을 측정하였다. Teflon 코팅의 경우 두 가지 방법 모두 시간에 따른 접촉각 변화가 거의 존재하지 않았으나, 이산화 티타늄 코팅의 경우 시간이 지났을 때 코팅 직후 대비 접촉각이 감소하였다. 코팅 후 7일 간 방치한 결과 Teflon 코팅 대비 이산화 티타늄 코팅의 코팅 지속력이 비교적 떨어짐을 확인하였다.

실제 유체가 시편에 접촉하였을 때 코팅에 어떠한 영향을 끼치는지 확인하기 위한 실험도 진행하였다. Fig. 3(b)의 좌측 그래프는 코팅한 시편이 유체와 오랜 기간 닿았을 때의 변화를 관찰하기 위해 미네랄 오일이 담긴 25 mL vial에 코팅된 시편을 넣고 7일간 방치 후 접촉각을 측정한 결과이다. 측정 결과 F800과 F1601V는 코팅 직후와 비교하였을 때 접촉각의 유의미한 차이가 없었다. 하지만 이산화 티타늄 코팅의 경우 85~105° 사이의 접촉각을 가져 코팅의 효과가 사라지거나 약화되었다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 3(b)의 우측 그래프는 시편을 기울인 상태에서 물과 미네랄 오일을 시린지로 일정량의 부피만큼 흘려준 후 접촉각을 측정하여 그래프로 나타내었다. 실험 과정에서 Teflon 계열의 코팅이 된 시편에 유체를 흘렸을 때에는 유체가 매달려 있지 못하고 빠르게 흘러가거나 뿜겨 나가는 듯한 모습을 확인하였으나 이산화 티타늄 코팅이 된 시편은 실험 도중 시편의 표면에 유체가 맺히는 경우가 발생하였다. 접촉각을 측정한 결과 미네랄 오일에 담구어 놓은 결과와 유사하게 이산화 티타늄 코팅에서 접촉각의 감소가 관찰되었다.

Fig. 3의 결과 공통적으로 Teflon 코팅은 실험 전후의 접촉각 차이가 크지 않았으나 이산화 티타늄 코팅은 115°에서 최대 95°까지 평균적으로 20° 정도의 접촉각의 감소를 보이며 소수성이 저하되었음을 보였다. 이산화 티타늄 코팅의 경우 앞서 결과에서 확인한

것과 같이 표면에 흰색 입자가 부착되어 소수성이 향상되는데, 유체가 흐르면서 이 입자들이 떨어지거나 불안정해져 소수성이 하락하는 것으로 판단된다. 지속력 평가 결과 다양한 환경에서 Teflon 코팅은 소수성의 변화가 거의 없어 지속력이 좋다고 할 수 있었으나 이산화 티타늄 코팅의 경우 어떠한 자극이 가해지거나 시간이 경과함에 따라 소수성이 감소하였기 때문에 지속력이 좋지 않은 것으로 판단된다. 이는 시편으로부터 시간 경과나 외부 자극에 의해 이산화 티타늄 입자가 떨어져 나가기 때문에 낮은 안정성을 보이는 것으로 예상된다. 이러한 문제는 시편으로부터 입자가 떨어지는 것을 방지하기 위한 추가적인 처리로 일부 해결할 수 있을 것으로 생각되나, 이는 코팅 과정이 복잡해지는 또다른 문제를 야기할 수 있다.

3-3. 투명도 및 소수성 동시 향상

미세 유체 장치를 사용할 때 소수성을 향상시켜 장치 내부에 액적이 달라붙지 않게 하는 것도 중요하지만, 해당 장치 및 시스템이 잘 작동되고 있는지 확인하기 위해 내부를 관찰할 수 있는 환경을 만드는 것 또한 중요하다. 이러한 투명도 확보를 위해 선행된 연구에서 연마에 의한 표면의 투명도 및 소수성 변화에 대한 연구를 진행하였으며[19], 연구 결과 SLA 방식 시편의 투명도가 유의미하게 개선될 수 있음을 확인하였다. 따라서 선행 연구의 투명도 향상 연마 과정을 적용한 시편에 본 연구에서 제안한 소수성 코팅을 적용하였을 때 시편의 투명도와 소수성을 동시에 확보할 수 있는지에 대해 확인하였다.

Fig. 4(a)는 1 cm 두께의 시편 연마 전후의 시편 투명도를 사진으로 비교한 표이다. 여러 입방을 가진 사포 및 컴파운드 용액으로 연마한 후 소수성 코팅까지 진행한 시편 아래에 글자가 적힌 종이를 대어 해당 글자가 얼마나 선명하게 보이는지 정성적으로 비교하였다. 연마를 하지 않은 시편들은 공통적으로 상이 여러 개로 보였으며, 충분한 투명도가 확보되지 않았음을 관찰하였다. 반면 연마 후의

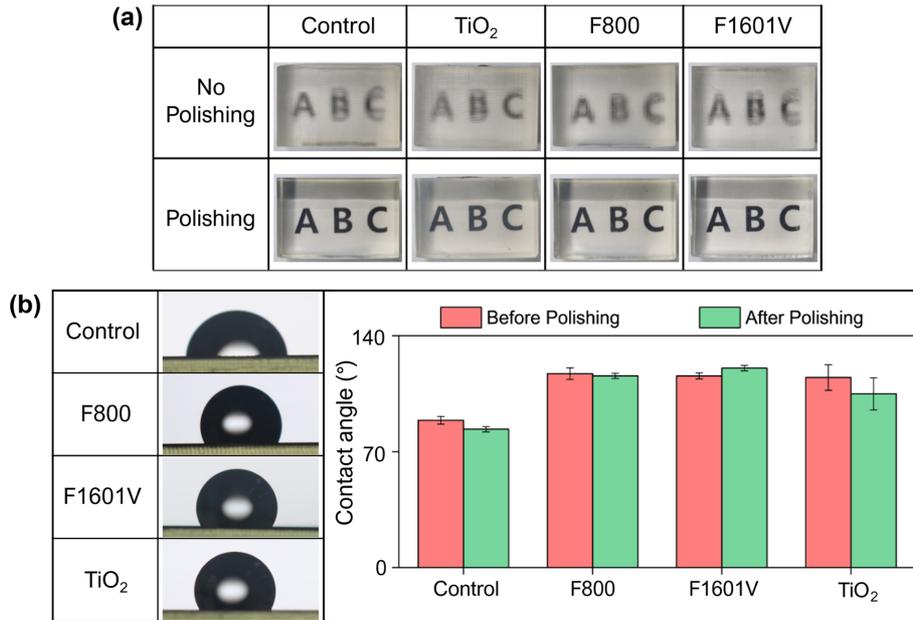


Fig. 4. Effect of polishing on surface properties. (a) Transparency changes of samples before and after polishing. (b) Contact angles of polished samples. The red bar is the contact angle before polishing, and the green bar is the contact angle after polishing. The error bar on each graph represents the standard deviation.

시편들은 'ABC' 글자를 하나의 상으로 확인, 시편을 통과하여 관찰할 수 있을 정도의 투명도를 확보하였지만 이산화 티타늄의 경우 흰색 입자에 의한 빛의 산란 효과로 인해 Teflon 코팅 대비 상대적으로 낮은 투명도를 가졌다. Fig. 4(b)에서는 연마한 시편에 각각의 코팅 방법을 적용한 후 물방울을 시편 위에 올려 접촉각을 측정하고 사진과 그래프로 나타내었다. 실험 결과 모든 코팅 방법에서 연마 후 코팅을 한 시편에서도 둥근 물방울의 형태를 관찰하였다. 연마 전과 후의 접촉각을 비교한 그래프에서 연마를 하더라도 접촉각의 유의미한 변화가 없음을 확인하였다.

3-4. 미세유체 시스템 제작 시연

Teflon 코팅과 이산화 티타늄 코팅 방법을 이용해 SLA 3D 프린터로 제작된 시편을 코팅하였을 때, Teflon 코팅이 이산화 티타늄 코팅보다 우수한 코팅 유지력과 투명도를 가졌기 때문에 미세 유체 시스템 제작에 적합한 코팅 방법으로 선정하였다. Teflon 코팅 방법 중 코팅 방법이 간단한 Fluoropel 800을 이용하여 미세 유체 장치 제작에 활용하였다.

Fig. 5(a)는 3D 프린터로 제작한 미세 유체 장치의 구성도 및 실제 사진이다. 전기를 통해서 물방울을 제어하는 액적 접촉 충전 현상(Electrophoresis of Charged Droplet, ECD) [21-22]에 사용되는 미세 유체 칩을 제작하였으며, 미세 유체 칩은 SLA 방식의 3D printer로 출력하였다. 내부 관찰을 위한 1.5 cm 두께의 벽면 부분은 연마를 통해 충분한 투명도를 확보할 수 있었다. 전극이 포함된 밀면과 옆면은 Fluoropel 800을 사용하여 코팅함으로써 액적이 표면에 달라붙는 것을 방지하였다. 칩 내부는 미네랄 오일로 채워졌으며, 오일 속 물방울의 접촉각을 측정한 결과 165° 정도로 매우 높은 소수성이 나타남을 확인하였다.

Fig. 5(b)는 제작된 칩에서의 액적 컨트롤 및 회수까지의 과정을 나타내었다. Fig. 5(b)의 위쪽은 ECD를 활용하여 물방울을 조작한

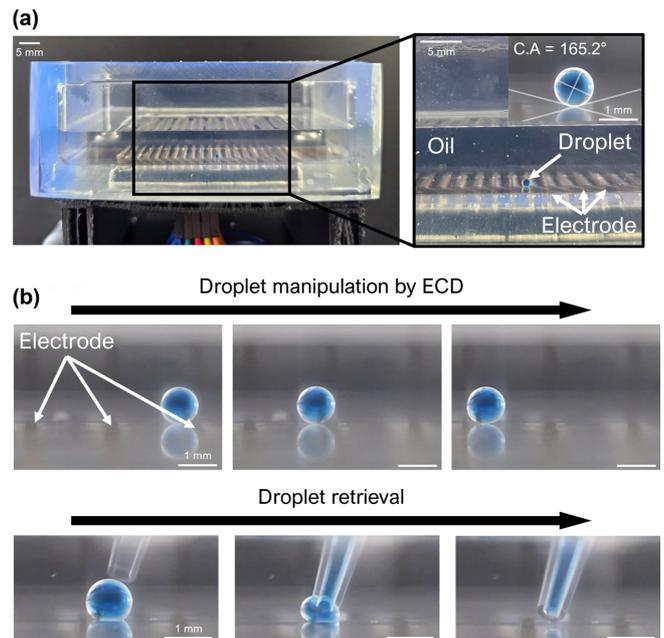


Fig. 5. Demonstration of fabrication of microfluidic system. (a) A photograph of manufactured microfluidic device. The electrode at the bottom is polished, and oil fills the inside of the device. The contact angle of droplet in the device is 165°. (b) A sequence image of the movement of water droplets according to the polarity change of electrodes (top) and a sequence image of process of collecting a water droplet from microfluidic device using a pipette (bottom).

사진으로, 조작 과정에서 물방울이 칩 바닥에 붙는 문제 없이 정상적으로 작동하였다. 아래쪽 사진은 조작이 끝난 물방울의 회수를 시연한 것으로 잔여물 없이 모든 물방울을 회수할 수 있었다. 하지만 ECD를 활용한 장시간의 물방울 조작에서는 전극에 물방울이

달라붙는 현상이 관찰되었다. 이는 접촉 충전 중 물방울과 전극 사이에서 전류의 흐름으로 코팅의 일부분이 손상이 나타나며 생긴 문제로 판단된다. 따라서 전극에 전류 흐름에도 손상되지 않는 추가적인 소수성 코팅이 필요하며 전기장이 소수성 코팅에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 광경화성 수지를 이용한 SLA 방식의 3D 프린팅 출력물에 다양한 소수성 코팅 방법을 적용하여 표면 젖음성의 변화에 대한 체계적인 정보를 제공하고, 미세유체 시스템의 제작에 SLA 방식의 3D 프린팅 출력물을 활용하기 위한 표면 처리 방법을 제안하기 위한 연구를 수행하였다. 먼저, 표면 젖음성 향상을 위해 Teflon 코팅법과 이산화 티타늄 코팅법을 SLA 시편에 적용하였을 때, 두 코팅법 모두 유의한 접촉각의 향상을 보였지만, 이산화 티타늄 코팅의 경우 측정 편차가 컸는데 이는 코팅 과정에서 입자가 시편에 일정하게 도포되지 못하여 편차가 크게 난 것으로 판단된다. 또한, 다양한 환경에서의 소수성 코팅의 유지력 평가를 수행하였다. Teflon 코팅법은 다양한 환경에서 모두 높은 접촉각을 유지한 반면, 이산화 티타늄 코팅은 유체에 접촉이 있는 후에는 접촉각이 낮아지는 경향을 보였다. 이 역시, 표면에 코팅된 이산화 티타늄 코팅 입자에 의한 영향으로 예상되며 dip-coating과 같은 간단한 코팅 방법으로 SLA 표면의 표면 특성을 개선하기 위해서는 Teflon 코팅법이 적합한 것으로 판단된다. SLA 출력물을 미세유체 시스템의 제작에 활용하기 위해 선행된 연구에서 제안한 투명도 확보 방법과 함께 소수성 코팅을 수행하였다. 모든 소수성 코팅 방법에서 투명도 개선 전과 후에 접촉각의 향상이 있었지만, 이산화 티타늄 코팅은 흰색의 입자가 출력물 표면에 남아 투명도가 다소 저해되는 문제가 있었다. 따라서, 미세유체 시스템의 제작에 적합한 코팅 방법은 투명도를 저해하지 않으며 소수성을 개선할 수 있는 Teflon 코팅이 적합한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 선정된 소수성 코팅 방법을 이용하여 미세유체 칩을 SLA 방식으로 제작하여 디지털 미세유체 기술 중 액적 접촉 충전 현상을 성공적으로 시연하였다. 본 연구를 통해 기존에 SLA 방식 프린팅이 미세 유체 장치 제작에 있어 가지고 있던 소수성 및 투명도의 문제점을 해결하였으며, 이를 통해 SLA 프린팅이 다양한 방식의 미세 유체 연구를 위한 프로토타입 장치 개발에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감 사

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2023년)에 의하여 연구되었습니다.

Reference

- Karakurt, I., and Lin, L., "3D Printing Technologies: Techniques, Materials, and Post-processing," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, **28**, 134-143(2020).
- Lee, J. Y., An, J. and Chua, C. K., "Fundamentals and Applications of 3D Printing for Novel Materials," *Appl. Mater. Today.*, **7**, 120-133(2017).
- Shahrubudin, N., Lee, T. C. and Ramlan, R. J. P. M., "An Overview on 3D Printing Technology : Technological, Materials, and Applications," *Procedia. Manuf.*, **35**, 1286-1296(2019).
- Dhinakaran, V., Kumar, K. M., Ram, P. B., Ravichandran, M. and Vinayagamorthy, M., "A Review on Recent Advancements In Fused Deposition Modeling," *Mater. Today: Proc.*, **27**, 752-756(2020).
- Gaal, G., Mendes, M., de Almeida, T. P., Piazzetta, M. H., Gobbi, A. L., Riul Jr, A. and Rodrigues, V., "Simplified Fabrication of Integrated Microfluidic Devices Using Fused Deposition Modeling 3D Printing," *Sens. Actuators B Chem.*, **242**, 35-40(2017).
- Shanmugam, V., Pavan, M. V., Babu, K. and Karnan, B., "Fused Deposition Modeling Based Polymeric Materials and Their Performance: A Review," *Polym. Compos.*, **42**(11), 5656-5677(2021).
- Huang, J., Qin, Q. and Wang, J., "A Review of Stereolithography: Processes and Systems," *Processes*, **8**(9), 1138(2020).
- Park, H. K., Shin, M., Kim, B., Park, J. W. and Lee, H., "A Visible Light-curable Yet Visible Wavelength-transparent Resin for Stereolithography 3D Printing," *NPG Asia Mater.*, **10**(4), 82-89(2018).
- Bagheri, A. and Jin, J., "Photopolymerization in 3D Printing," *Acs Appl. Polym. Mater.*, **1**(4), 593-611(2019).
- Bhattacharjee, N., Urrios, A., Kang, S. and Folch, A., "The Upcoming 3D-printing Revolution in Microfluidics," *Lab Chip*, **16**(10), 1720-1742(2016).
- Nadagouda, M. N., Rastogi, V. and Ginn, M., "A Review on 3D Printing Techniques for Medical Applications," *Curr. Opin. Chem. Eng.*, **28**, 152-157(2020).
- Au, A. K., Huynh, W., Horowitz, L. F. and Folch, A., "3D-printed Microfluidics," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**(12), 3862-3881(2016).
- Tack, P., Victor, J., Gemmel, P. and Annemans, L., "3D-printing Techniques in a Medical Setting: a Systematic Literature Review," *Biomed. Eng. Online*, **15**, 1-21(2016).
- Comina, G., Suska, A. and Filippini, D., "Low Cost Lab-on-a-chip Prototyping with a Consumer Grade 3D Printer," *Lab Chip*, **14**(16), 2978-2982(2014).
- Günther, D., Heymel, B., Franz Günther, J. and Ederer, I., "Continuous 3D-printing for Additive Manufacturing," *Rapid Prototyp. J.*, **20**(4), 320-327(2014).
- 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).
- Jafari, R., Cloutier, C., Allahdini, A. and Momen, G., "Recent Progress and Challenges with 3D Printing of Patterned Hydrophobic and Superhydrophobic Surfaces," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **103**, 1225-1238(2019).
- Bae, S. J. and Im, D. J., "Comparison of Surface Characteristics According to 3D Printing Methods and Materials for the Fabrication of Microfluidic Systems," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(5), 706-713(2019).
- Bae, S. J. and Im, D. J., "A Study on the Changes in Surface Properties According to Post-treatment of SLA 3D Printing Materials," *Korean Chem. Eng. Res.*, **60**(1), 132-138(2022).
- Barraze, B., Olate-Moya, F., Montecinos, G., Ortega, J. H., Rosenkranz, A., Tamburrino, A. and Palza, H., "Superhydrophobic SLA 3D Printed Materials Modified with Nanoparticles Biomimicking the Hierarchical Structure of a Rice Leaf," *Sci. Technol. Adv.*

Mater., **23**(1), 300-321(2022).

21. 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**(13), 5168-5174(2011).
22. Im, D. J., Yoo, B. S., Ahn, M. M., Moon, D. and Kang, I. S., "Digital Electrophoresis of Charged Droplets," *Anal. Chem.* **85**(8), 4038-4044(2013).

Authors

Jae Uk Heo: Graduate student, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea; wodnr936@pukyong.ac.kr

Seo Jun Bae: Graduate student, Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan, 48513, Korea; sinelf@pukyong.ac.kr

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