

Formulation and ink-jet 3D printability of photo curable nano silica ink

Jae-Young Lee^{*,**}, Ji-Hyeon Lee^{*}, Jae-Hyeon Park^{*}, Sahn Nahm^{**}, Kwang-Taek Hwang^{*}, Jin-Ho Kim^{*} and Kyu-Sung Han^{*,†}

^{*}Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Icheon 17303, Korea

^{**}Department of Material Science and Engineering, Korea University, Seoul 02841, Korea

(Received September 28, 2019)

(Revised October 21, 2019)

(Accepted October 28, 2019)

Abstract Recently, ink-jet printing technology has been applied for various industries such as semiconductor, display, ceramic tile decoration. Ink-jet printing has advantages of high resolution patterning, fast printing speed, high ink efficiency and many attempts have been made to apply functional materials with excellent physical and chemical properties for the ink-jet printing process. Due to these advantages, research scope of ink-jet printing is expanding from conventional two-dimensional printing to three-dimensional printing. In order to expand the application of ink-jet printing, it is necessary to optimize the rheological properties of the ink and the interaction with the substrate. In this study, photo curable ceramic complex ink containing nano silica particles were synthesized and its printability was characterized. Contact angle of the photo curable silica ink were modified by control of the ink composition and the surface property of the substrate. Effects of contact angle on printing resolution and three-dimensional printability were investigated in detail.

Key words Ceramic complex ink, Ink-jet printing, Nano silica, Additive manufacturing, Photopolymerization

광경화 나노 실리카 잉크의 합성 및 잉크젯 프린팅 적층 특성평가

이제영^{*,**}, 이지현^{*}, 박재현^{*}, 남산^{**}, 황광택^{*}, 김진호^{*}, 한규성^{*,†}

^{*}한국세라믹기술원 도자기기술융합센터, 이천, 17303

^{**}고려대학교 신소재공학부, 서울, 02841

(2019년 9월 28일 접수)

(2019년 10월 21일 심사완료)

(2019년 10월 28일 게재확정)

요약 디지털 잉크젯 프린팅 기술은 고해상도, 빠른 인쇄 속도, 높은 잉크 효율과 같은 장점과 함께 다양한 소재 적용이 용이하여 반도체, 디스플레이, 세라믹 타일 등의 산업 분야에서 주목을 받고 있다. 최근에는 전통적인 잉크 소재에서 벗어나 우수한 내열성, 내광성, 내화학성 등을 보이는 기능성 소재도 잉크젯 프린팅 공정에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 특히 2차원 인쇄뿐만 아니라 3차원 적층인쇄에 관한 연구도 시작되고 있으며 이를 위해서는 토출되는 잉크의 유연학적 물성과 프린트되는 기판과의 상호작용을 제어하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 나노 실리카 입자가 포함된 광경화성 세라믹 잉크를 합성하고 잉크의 물성과 프린팅 기판의 표면특성을 제어하였다. 나노 실리카 입자가 포함된 광경화성 세라믹 잉크의 퍼짐현상을 억제하고 기판과의 접촉각 특성을 개선함으로써 결과적으로 프린팅 해상도 및 적층성을 향상시켰으며 잉크젯 프린팅을 이용한 광경화 나노 실리카 잉크의 3D 프린팅에 대한 가능성을 확인하였다.

1. 서론

디지털 프린팅 공정은 기존의 전통적인 그래픽 프린팅 방식인 그라비아, 스크린, 오프셋 프린팅 기술과는 다르게 패턴이나 이미지를 출력하기 위한 디자인 원판이 요

구되지 않으며 소프트웨어에 의해 디지털화된 패턴 및 이미지 데이터를 프린터로 전송함으로써 기판에 출력하는 기술이다. 그중에서도 잉크젯 프린팅 기술은 미세한 잉크 액적을 비접촉식으로 기판에 토출함으로써 고해상도의 패턴과 이미지를 구현할 수 있어 기존의 가정용, 사무용 영역뿐만 아니라 LED, 전자 회로 프린팅과 같은 전자 디바이스 제작, 세포 패턴닝, 바이오 칩, 바이오 센서, 조직 공학과 같은 바이오 프린팅, 촉매 프린팅, 패키

[†]Corresponding author

E-mail: kh389@kicet.re.kr

징, 건축용 세라믹 타일 장식 프린팅 등에 내우 광범위하게 적용 연구가 진행되고 있다. 또한 이에 상응하는 새로운 잉크젯 프린팅용 잉크 소재의 개발에 대해서도 수요가 점점 증가하고 있다[1,2].

최근 잉크젯 프린팅 기술은 기존 단순 컬러 잉크 위주의 소재에서 벗어나 물리, 화학적으로 뛰어난 성능을 나타내는 새로운 복합소재를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 광경화성 소재를 이용하여 3D 프린팅 공정까지 적용이 시도되고 있다. 광중합 방식(photopolymerization)은 UV 또는 가시광선 영역 파장의 빛 에너지를 이용하여 액체 상태의 광경화 모노머를 경화시켜 고체화시키는 방식이다. 광중합 방식은 매우 짧은 시간에 고체 중합체로의 중합 반응이 진행되는 특징을 가지고 있으며, 낮은 에너지에서도 반응이 진행되고 최종 기물의 유연성 및 표면 특성을 조절할 수 있는 장점들을 갖추고 있다. 이러한 장점 때문에 광중합은 필름, 코팅, 잉크, 접착제 그리고 현재는 3D 프린팅 공정에서 아주 활발하게 활용되고 있다[3].

잉크젯 프린팅은 프린트 헤드에서 토출된 미세 잉크 액적이 기판에 탄착되어 망점을 형성하는 과정을 거쳐 원하는 패턴을 형성하기 때문에 사용되는 잉크의 조성, 토출된 액적 형성 거동, 기판과의 상호 작용 등이 최종 프린팅 된 결과물에 큰 영향을 미친다. 따라서 새로운 잉크 소재를 적용할 때에는 프린터 헤드에서 토출된 후 이상적인 잉크 액적을 형성하고 기판에 퍼짐현상 없이 탄착되어 원하는 물성의 잉크젯 프린팅 패턴을 얻을 수 있도록 적용되는 잉크의 물성과 프린터 구동 조건을 최적화하는 것이 필수적이다[4,5].

본 논문에서는 나노 실리카 입자와 광경화성 모노머를 기반으로 잉크를 합성하고 잉크젯 프린팅 공정에 적용이 가능하도록 유변학적 거동 및 프린트 헤드에서의 토출 거동을 최적화하였다. 특히 합성된 광경화 나노 실리카 잉크를 적용하여 잉크젯 프린팅 공정에서의 적층성을 향상시키기 위해 나노 실리카 잉크와 프린팅 기판의 상호 작용을 제어함으로써 잉크 퍼짐 현상을 억제하고 결과적으로 프린팅 특성에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 실험 방법

실리카 나노 입자의 표면 개질을 위해 silane coupling agent인 (3-Mercaptopropyl) trimethoxy silane(MPTMS, Sigma Aldrich)을 첨가한 후 50°C에서 24시간 동안 가수분해 및 축합 반응을 진행하였다. 나노 실리카 잉크에 광경화 특성을 부여하기 위하여 표면 처리가 완료된 실리카 입자를 광경화성 아크릴계 모노머인 hexanediol diacrylate(HDDA, Miwon chemical)와 3시간 동안 상온

교반하여 복합화하였다[6,7].

광경화성 나노 실리카 잉크의 인쇄 적층성을 향상시키기 위해 distilled water를 첨가하여 수계 복합 나노 실리카 잉크를 제조하였으며 소수성으로 표면 개질된 기판에서 접촉각 특성을 개선시키고자 하였다. 수계 복합 나노 실리카 잉크의 경우 기존의 나노 실리카 잉크에 distilled water와 모노머를 첨가해준 후 서로 다른 극성을 가진 두 물질을 융합해주기 위하여 음이온성 계면활성제인 alkyldiphenyloxide disulfonate(PROCHEM)을 첨가하여 sonicator(UW-3100, Bandelin electronics)를 이용하여 10분 동안 분산하였다. 이후 광중합 반응을 위해 350~430 nm의 UV 파장 범위에서 반응하는 p-phenylbis(2, 4, 6-trimethylbenzoyl) phosphine oxide(Sigma Aldrich)를 광개시제로 첨가하여 sonicator으로 10분 동안 분산하였다.

제조된 광경화 나노 실리카 잉크의 유변학적 특성을 확인하기 위하여 rotational rheometer(HAAKE MARS III, Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 25°C에서 점도를 측정하였으며, 표면장력은 surface tension analyzer(DST-60, Surface electro optics co.)를 이용하여 측정하였다. 나노 실리카 잉크의 접촉각은 perfluorooctyl-trichlorosilane(PFTS, Sigma Aldrich)을 1 wt% 농도로 표면처리한 유리 기판을 이용하여 act angle analyzer(PHX300, Surface electro optics)로 측정하였다. 나노 실리카 잉크의 광중합 특성은 photo-differential scanning calorimetry(Photo-DSC, DSC 204 F1 Phoenix, Netzsch)를 사용하여 분석하였으며 300~520 nm 파장의 UV 광원을 사용하였다. 잉크젯 프린팅 거동은 drop watcher(Cera DW, STI)로 분석되었고, 구동 조건은 25°C 온도에서 구동 전압을 65~84 V로, 상승 구간과 하강 구간은 1~2.4 μ s, 유지시간은 3~7.6 μ s, 휴지시간은 1 μ s로 설정하여 측정하였으며 0~180 μ s 동안 잉크의 토출 거동을 관찰하였다. 잉크젯 프린팅된 나노 실리카 잉크 액적의 적층 형상은 광학 현미경(Axioscope, Zeiss)과 3차원 레이저 현미경(OLS4500, Olympus)을 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Figure 1(a)에 광경화 실리카 잉크의 합성을 위해 사용된 나노 실리카 입자의 TEM 이미지를 나타내었다. 실리카 입자는 약 50~90 nm의 입도를 나타내고 있으며 구형의 형상을 보여주고 있음을 확인하였다. 실리카 잉크를 잉크젯 프린팅 공정에 적용하기 위해서는 약 300 nm 이하의 평균 입자 크기를 나타내어야 프린트 헤드 노즐에서의 막힘 현상을 방지할 수 있는 것으로 보고된 바 있으며 본 연구에서 사용된 실리카 입자는 대부분 90 nm 이하의 균일한 입도 및 구형의 형상을 보여주고 있어 이와

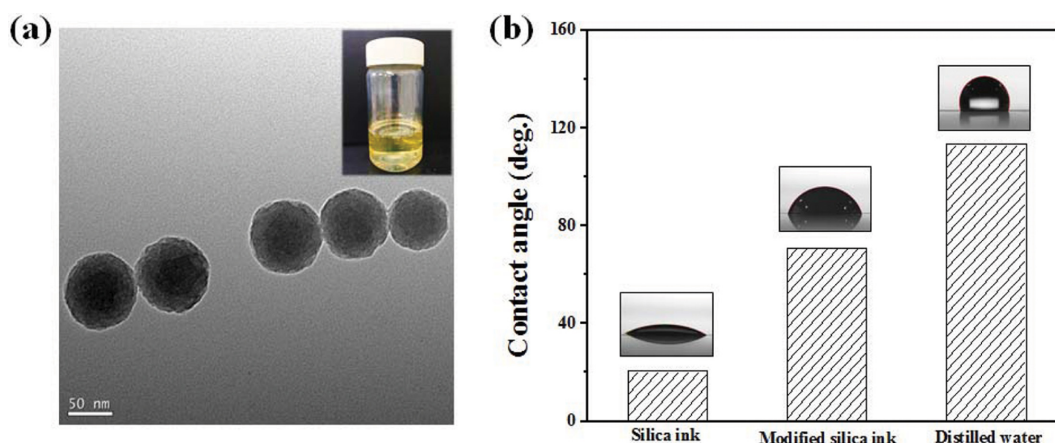


Fig. 1. TEM image of nano silica particles. Inset shows synthesized photocurable nano silica ink. (b) Contact angle of silica ink, modified silica ink and distilled water on PFTS treated glass substrate.

Table 1
Rheological properties of silica ink and modified silica ink

	Viscosity (mPas)	Density (g/ml)	Surface tension (mN/m)	Inverse of ohnesorge number (Z)
Silica ink	5.68	0.94	24.21	5.82
Modified silica ink	4.83	0.98	27.91	7.50

같은 요구조건을 충족시키는 것으로 판단된다[8]. Figure 1(b)는 실리카 나노 입자를 광경화성 모노머인 HDDA와 복합화한 후 PFTS를 이용하여 소수성으로 표면 처리된 유리 기판에서의 접촉각을 나타낸 결과이다. 잉크젯 프린트 후 탄착된 잉크 액적의 접촉각이 낮으면 잉크 퍼짐 현상이 발생하고 이로 인해 인쇄 해상도가 저하되는 문제가 발생할 수 있다. 잉크 퍼짐 현상을 방지하고 원활한 프린팅 및 적층특성을 확보하기 위해서는 기판의 표면 에너지를 낮추어 잉크 액적과 기판 사이의 접촉각을 증가시킬 필요가 있다[9,10]. 잉크가 프린팅 되는 기판의 표면 에너지를 낮추기 위해 불소 기반의 PFTS로 기판을 표면 처리 후 실리카 잉크 액적의 접촉각 변화를 측정하였다. 기판을 표면 처리하지 않았을 경우에는 잉크 퍼짐 현상으로 인하여 접촉각 측정이 불가능하였다. 기판을 표면 처리 후 나노 실리카 잉크는 초기 20.6°의 접촉각을 나타내었으나 5 s 지난 후에는 측정이 불가할 정도로 퍼짐 현상이 심하게 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 나노 실리카 잉크의 퍼짐 현상을 개선하기 위해 수계 용매와 광경화 모노머를 음이온성 계면활성제인 alkylidiphenyloxide disulfonate를 이용하여 복합화하였다. 나노 실리카 잉크에 수계 용매를 첨가함으로써 PFTS로 처리된 기판에서의 소수성 효과를 극대화하고자 하였다. 접촉각 측정 결과 수계 복합 나노 실리카 잉크는 원활하게 잉크의 퍼짐 현상이 억제되어 접촉각이 70.9°로 크게 향상되었음을 확인하였다.

합성된 수계 복합 나노 실리카 잉크의 잉크젯 프린터

에서의 토출성을 확보하기 위해 유변학적 물성을 최적화하였으며 Table 1에 주요 물성을 나타내었다. 잉크젯 프린터로 잉크를 토출함에 있어서 가장 영향을 크게 미치는 물성은 점도와 표면장력으로 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크의 점도는 각각 5.68, 4.83 mPas로 측정되었고 표면장력은 각각 24.21, 27.9 mN/m로 측정되었다. 이와 같은 결과를 이용하여 계산된 Ohnesorge number(Oh)를 통하여 합성된 잉크의 토출 가능성을 확인할 수 있다. 일반적인 drop on demand(DOD) 방식의 잉크젯 프린팅에서는 Ohnesorge number의 역수(Z)가 1에서 10 사이의 값을 나타낼 때 토출성이 확보된 것으로 판단한다[11-14].

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\gamma\rho\alpha}}$$

η 는 잉크의 점도, ρ 는 밀도, α 는 노즐의 직경, γ 는 표면장력을 의미한다. 유변학적 물성을 최적화한 후 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크의 Z값을 계산한 결과 각각 5.82, 7.50로 토출에 적합한 결과를 나타냄을 확인하였다.

Figure 2는 표면장력과 점도가 최적화된 나노 실리카 잉크를 이용하여 잉크젯 프린터 헤드에서의 토출 조건을 최적화한 결과이다. Figure 2(a)는 프린터 헤드의 구동 조건을 최적화하기 전 나노 실리카 잉크의 액적 형성 거동을 관찰한 예시이다. 구동전압(voltage)은 70 V, 상승 구간(rising time)과 하강구간(fall time)은 각각 3 μ s, 그

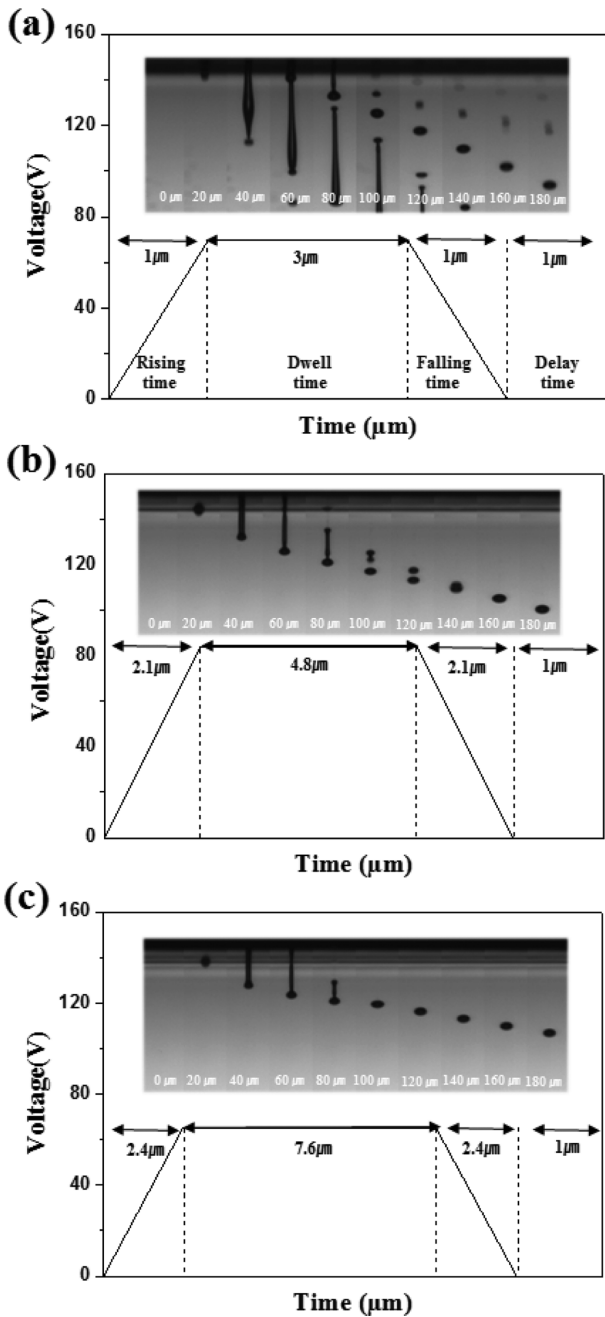


Fig. 2. Operation conditions of Ink-jet printing using (a) silica ink before rheological optimization, (b) silica ink and (c) modified silica ink after rheological optimization.

리고 유지구간(dwell time)은 1 μs로 설정하여 측정하였다. 토출 조건이 최적화되기 전에는 잉크가 프린터 헤드에서 불안정하게 토출되는 모습을 확인할 수 있었고 잉크의 늘어짐이나 위성 액적과 같은 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 잉크젯 프린팅 시 인쇄 해상도를 저하시키는 주요한 원인이 되며 특히 원하는 위치에 반복적인 적층 공정을 어렵게 만든다. 따라서 프린터 헤드의 구동 조건을 다음과 같이 최적화하였다. Figure 2(b)의 나노 실리카 잉크는 구동전압 84 V, 상승구간과 하강구간을

2.1 μs, 유지구간은 4.8 μs로 설정하였고, Fig. 2(c)의 수계 복합 실리카 잉크는 구동전압 65 V, 상승구간과 하강구간은 2.4 μs, 유지구간은 7.6 μs로 최적화한 후 원활한 토출 특성과 액적 형성 거동을 관찰할 수 있었다. 나노 실리카 잉크에 수계 용매가 복합화되기 전후 액적 형성 거동을 비교해보면 Fig. 2(b)의 나노 실리카 잉크는 토출에 필요한 구동전압이 높아 형성되는 액적의 크기가 비교적 크고 토출 속도가 빨라 위성 액적이 형성되었다가 140 μs에서 단일 액적으로 합쳐지는 거동을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 2(c)의 수계 복합 나노 실리카 잉크의 경우 액적이 토출된 후 분리되는 현상은 관찰되지 않았으며 100 μs가 지난 후 구형의 단일 액적이 형성되는 거동을 확인할 수 있었다. 이와 같이 액적의 크기가 작을수록 정밀한 프린팅이 가능하며 액적이 토출되는 속도가 느리면 스플래시 드랍을 방지할 수 있다. 또한 헤드에서 토출된 잉크가 구형을 띄는데 걸리는 시간이 각각 140 μs, 100 μs로써 수계 복합 나노 실리카 잉크를 이용하여 프린팅 시 기관과 헤드의 거리 간격을 좁힐 수 있어 원하는 위치에 프린팅 중 외부의 변수에 안정적이다.

Figure 3은 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크를 동일한 위치에 5회 반복하여 프린팅을 진행한 후 탄착된 잉크 액적의 형상을 관찰한 결과로 Fig. 1(b)의 접촉각 특성 분석 결과와 같이 수계 복합 나노 실리카 잉크가 퍼짐 현상이 억제되어 보다 미세한 패턴을 형성할 수 있음을 확인하였다. 또한 잉크의 유연학적 물성과 더불어 퍼짐 현상이 발생하기 전 탄착된 잉크의 경화 시 광중합 반응이 중요한 변수로 작용한다. 광개시제는 광중합 반응 초기 단계에서 UV 파장의 광원을 흡수하여 자유 라디칼을 생성시키고 주변의 모노머와 반응하여 네트워크를 형성함으로써 광중합 반응에서 중요한 역할을 한다. 나노 실리카 잉크에 첨가한 광개시제의 첨가량에 따른 광중합 반응 거동을 확인하고 전환율을 다음과 같이 계산하였다[15-17].

$$\alpha(t) = \frac{\Delta H_{\text{sample}(t)}}{\Delta H_p} \times 100$$

$\alpha(t)$ 는 전환율, $\Delta H_{\text{sample}(t)}$ 는 photo DSC에서 측정된 sample의 acrylate 이중 결합에 대한 polymerization 엔탈피, ΔH_p 는 acrylate 이중 결합에 대한 polymerization($\Delta H_p = 684 \text{ kJ/kg}$), m 은 모노머의 질량이다. UV를 조사한 후 나노 실리카 잉크의 경우 0.2 s, 수계 복합 나노 실리카 잉크의 경우 0.1 s 후부터 반응이 일어나기 시작하였으며, 초기에는 빠르게 광중합 반응 속도가 상승하였으나 gel point 이상에서는 점점 저하되는 경향을 나타내었다. 전환율의 경우 첨가되는 광개시제의 농도를 0.1~3.0 wt%로 조절한 결과 최적화된 농도인 1 wt%를 첨가하여 측정하였으며, 나노 실리카 잉크는 55.6 % 수계 복

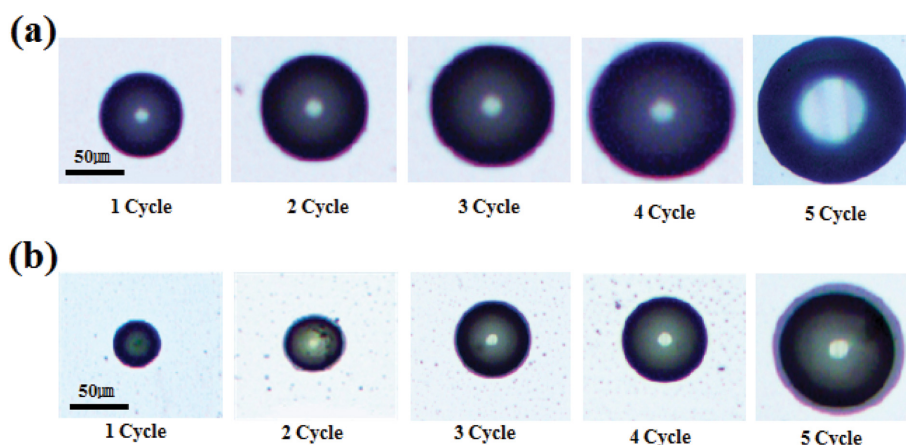


Fig. 3. Microscope images of ink-jet printed dot using (a) silica ink and (b) modified silica ink.

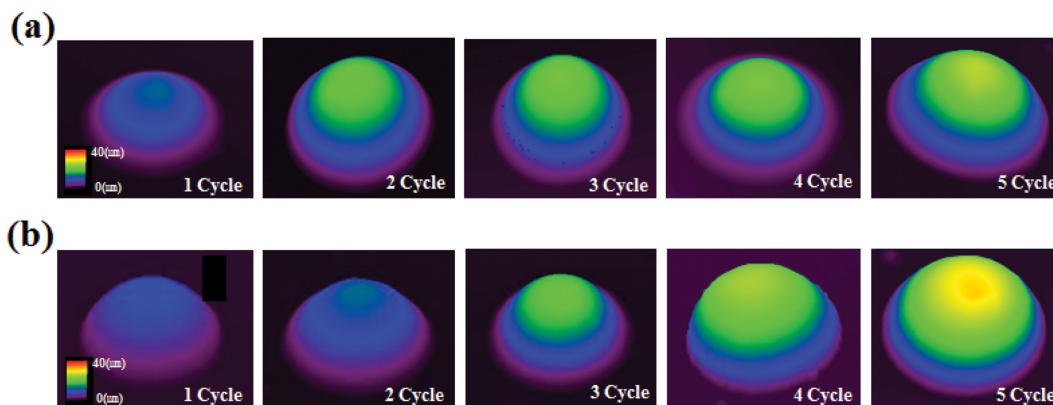


Fig. 4. 3D microscope images of ink-jet printed dot using (a) silica ink and (b) modified silica ink.

합 나노 실리카 잉크는 65.3 %의 전환률을 나타내었다.

Figure 4는 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크를 각각 1회에서 5회 프린팅 후 경화하였을 때 적층 거동을 3차원으로 관찰한 결과이며, 이에 대한 정량적 분석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Figure 5(a)~5(d)는 각각 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크를 이용하여 프린팅된 잉크 액적의 너비(width), 높이(height), 호의 길이(length), 단면적(cross section area)을 비교 분석한 결과이다. 나노 실리카 잉크의 1회 프린팅 후 잉크 액적의 너비는 65.86 μm , 높이는 14.27 μm , 호의 길이는 204.42 μm , 단면적은 423.42 μm^2 의 값을 나타내었고, 수계 복합 나노 실리카 잉크의 경우 탄착된 액적의 너비는 37.58 μm , 높이는 10.06 μm , 호의 길이는 111.19 μm , 단면적은 231.93 μm^2 의 값을 나타내었다. 프린팅을 1회 진행한 경우 나노 실리카 잉크 액적의 높게 적층되는 결과가 나타났다. 이는 잉크의 토출에 필요한 구동 전압이 높아 압전 소자의 변위 차이로 인한 내부 압력이 커지게 되고 결과적으로 분사력이 증가하여 액적의 크기가 증가하였기 때문으로 판단된다. 하지만 프린팅이 반복적으로 진행될수록 수계 복합 나노 실리카 잉크 액적

의 적층성이 점점 향상되어 4회 이상 프린팅 한 경우에는 수계 복합 나노 실리카 잉크 액적이 나노 실리카 잉크 액적보다 적층 높이가 더 증가하는 경향을 확인하였다. 최종적으로 프린팅을 5회 진행한 후 측정된 나노 실리카 잉크 액적의 너비는 115.77 μm , 높이는 26.76 μm , 호의 길이는 358.63 μm , 단면적은 2046.1 μm^2 의 값을 나타내었으며, 수계 복합 나노 실리카 잉크 액적의 너비는 93.95 μm , 높이는 30.78 μm , 호의 길이는 288.3 μm , 단면적은 1612.21 μm^2 의 값을 나타내었다. Fig. 5(a)에 나타낸 적층된 잉크 액적의 너비와 Fig. 5(b)에 나타낸 호의 길이의 경우 나노 실리카 잉크와 수계 복합 나노 실리카 잉크 모두 프린팅 횟수와 함께 증가하는 경향을 나타내었으나, 전반적으로 수계 복합 나노 실리카 잉크가 다소 낮은 경향을 관찰할 수 있었다. 이는 프린팅 기판의 표면에너지 낮추고 소수성으로 표면 개질함과 동시에 이러한 효과를 증가시키기 위하여 실리카 잉크와 수계 용매를 복합화 함으로써 Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 접촉각 특성을 20.6°에서 70.3°으로 크게 향상시킨 결과로 판단된다. 나노 실리카 잉크의 접촉각이 미치는 영향은 잉크젯 프린팅을 이용한 적층공정이 반복적으로

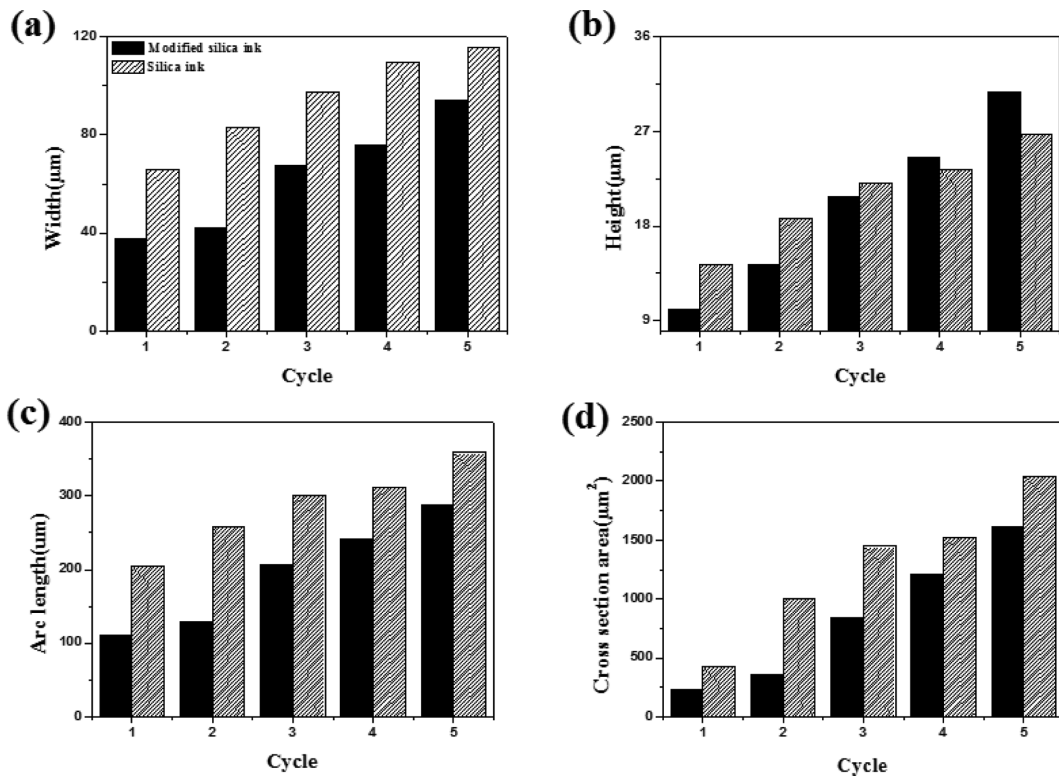


Fig. 5. Comparative analysis results of (a) width, (b) height, (c) arc length, (d) cross section area of ink-jet printed dot using silica ink and modified silica ink.

진행될수록 보다 명확하게 관찰되며 Fig. 5(c)와 같이 수계 복합 나노 실리카 잉크는 보다 적은 양의 잉크를 사용하여 프린팅이 진행되었음에도 불구하고 개선된 접촉각 특성으로 인해 Fig. 5(b)와 같이 적층 속도가 매우 향상된 결과를 확인할 수 있었다. 이는 본래 젖음성이 크고 접촉각이 낮은 나노 실리카 잉크를 프린팅 할 경우 발생하는 잉크 퍼짐 현상을 억제하여 미세한 프린팅 패턴 형성이 어려운 문제를 개선함으로써 해상도 및 적층성을 향상시킨 결과로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 나노 실리카 입자와 광경화 모노머를 이용하여 잉크젯 3D 프린팅에 적용 가능한 광경화 나노 실리카 잉크를 합성하고 잉크젯 프린팅을 이용한 적층 특성에 대해 분석하였다. 합성된 광경화 나노 실리카 잉크의 적층성 향상을 위해 음이온성 계면활성제를 이용하여 수계 용매와 광경화 모노머를 복합화하여 소수성으로 표면 개질된 프린팅 기판에서의 접촉각 특성을 개선한 결과 접촉각이 20.6° 에서 70.3° 로 크게 증가한 결과를 확인하였다. 잉크젯 프린터에서의 원활한 토출을 위해 유연학적 거동을 최적화하였으며 프린트 헤드의 구조조

건을 제어하여 위성 액적이 발생하지 않는 구형의 단일 액적이 형성됨을 확인하였다. 수계 용매가 복합된 광경화 나노 실리카 잉크는 보다 미세하게 토출되고 빠르게 단일 액적이 형성되었으며, 최종적으로 잉크젯 프린팅을 이용하여 반복적인 적층 공정을 진행한 결과 상대적으로 잉크 퍼짐 현상이 억제되어 적층성이 안정적으로 향상된 결과를 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부와 중소기업벤처부에서 지원하는 월드클래스 300 프로젝트 기술개발지원사업(S2641323)으로 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] B.J. De Gans, P.C. Duineveld and U.S. Schubert, "Ink-jet printing of polymers: state of the art and future developments", *Adv. Mater.* 16 (2004) 203.
- [2] H.S. Koo, M. Chen, P.C. Pan, L.T. Chou, F.M. Wu, S.J. Chang and T. Kawai, "Fabrication and chromatic characteristics of the greenish LCD colour-filter layer with nano-particle ink using inkjet printing technique", *Dis-*

- plays. 27 (2006) 124.
- [3] C. Check, R. Chartoff and S. Chang, "Inkjet printing of 3D nano-composites formed by photopolymerization of an acrylate monomer", *Reactive and Functional Polymers*. 97 (2015) 116.
- [4] J.B. Szczech, C.M. Gamota and J. Zhang, "Fine-line conductor manufacturing using drop-on demand PZT printing technology", *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing* 25 (2002) 26.
- [5] H.S. Koo, M. Chen, P.C. Pan, L.T. Chou, F.M. Wu and S. Chang, "Fabrication and chromatic characteristics of the greenish LCD colour-filter layer with nano-particle ink using inkjet printing technique", *Displays*. 27 (2006) 124.
- [6] S.K. Song, J.H. Hwang and K.R. Ha, "Spectroscopic analysis of silica nanoparticles modified with silane coupling agent", *Korean Chem. Eng. Res.* 49 (2011) 181.
- [7] J.W. Lee, S. Nahm, K.T. Hwang, J.H. Kim and K.S. Han, "The effect of silica composite properties on DLP-stereolithography based 3D printing", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 29 (2019) 54.
- [8] D. Gardini, M. Blosi, C. Zangelli and M. Dondi, "Ceramic ink-jet printing for digital decoration: physical constraints for ink design", *J. Nanosci. Nanotechnol.* 15 (2015) 3552.
- [9] Y. Son, C. Kim, D. Yang and D.J. Ahn, "Spreading of an inkjet droplet on a solid surface with a controlled contact angle at low Weber and Reynolds numbers", *Langmuir*. 24 (2008) 2900.
- [10] J.H. Oh and S.Y. Lim, "Precise size control of inkjet-printed droplets on a flexible polymer substrate using plasma surface treatment", *J. Micromech. Microeng.* 20 (2009) 015030.
- [11] Y. Guo, H.s. Patanwala and B. Bognet, "Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance", *Rapid Prototyp. J.* 23 (2017) 562.
- [12] E. Saleh, P. Woolliams, B. Clarke and A. Gregory, "3D inkjet-printed UV-curable inks for multi-functional electromagnetic applications", *Additive Manufacturing* 13 (2017) 143.
- [13] B. Derby, "Inkjet printing of functional and structural materials: fluid property requirements, feature stability, and resolution", *Annual Review of Materials Research* 40 (2010) 395.
- [14] J.W. Kwon, J.H. Lee, K.T. Hwang, J.H. Kim and K.S. Han, "Rheological behavior and ink-jet printing characteristics of aqueous ceramic complex ink", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 28 (2018) 123.
- [15] K.C. Wu and J.W. Halloran, "Photopolymerization monitoring of ceramic stereolithography resins by FTIR methods", *J. Mater. Sci.* 40 (2005) 71.
- [16] K.C. Wu and J.W. Halloran, "Ceramic stereolithography: additive manufacturing for ceramics by photopolymerization", *Annual Review of Materials Research* 46 (2016) 19.
- [17] X. Zhang, X.N. Jiang and C. Sun, "Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures", *Sensors and Actuators A: Physical.* 77 (1999) 149.