액적 형성에 미치는 물유리계 바인더의 조성과 토출조건의 영향

편성은^{1,2} · 이만식^{1,3} · 박대원² · 백재호^{1,*}

¹한국생산기술연구원 친환경재료공정그룹

²부산대학교 화학생명공학부

³과학기술연합대학원대학교 청정공정 및 시스템공학

Effects of Jetting Parameters and Sodium Silicate-Based Binder on Droplet Formation

Seongeun Pyeon^{1,2}, Man Sig Lee^{1,3}, Dae-Won Park², and Jae Ho Baek^{1,*}

¹Green Materials and Processes Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Republic of Korea

²Division of Chemical and Biomolecular Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

³Green Process & System Engineering Department, University of Science & Technology, Ulsan 44413, Republic of Korea

Abstract: Binder jetting additive manufacturing is one of the 3D printing technologies currently used to manufacture 3D geometries. In this process, a liquid binder agent is ejected to a desired position of a substrate. The binder's properties and the jetting condition used for form droplets can affect the formability of the geometries. Herein, we optimized the solid content and jetting condition of a sodium silicate-based inorganic binder, for 3D printing. To observe the range of single droplet formation, the behavior of the discharged droplets was analyzed by Z value, which is the inverse of the Ohnesorge number. As the solid content increased, a higher driving voltage was required to form the droplets to overcome viscous dissipation. For 40S(Z = 4.33) with a content of 40 wt%, the droplet tail from the nozzle was stretched further. The droplets of 25S(Z = 15.09) with a content of 25 wt% were accompanied by satellite droplets. The jetting condition was optimized for 25S, which was capable of ejection at various driving voltages. Stable single droplets were formed at a driving voltage of 20 V and a dwell time of 4 μ s. In addition, when ethylene glycol and glycerol were added into 25S as a humectant, stable droplets were formed under the optimum jetting condition, and each droplets was in the range of $2.70 < Z < 15.09$.

(Received October 29, 2019; Accepted February 25, 2020)

Keywords: 3D printing, binder jetting, inorganic binder, jettability, nozzle clogging, ohnesorge number

1. 서 론

적층 가공(Additive manufacturing; AM)으로 알려진 3D 프린팅 기술은 “원 소재를 깎으며 가공하는 절삭가공(Subtractive manufacturing)방식과는 대조적으로, 3차원 모델 데이터로부터 제품을 한 층 한 층 쌓아가는 방식의 가공 기술”로 정의된다. 3D 프린팅 기술은 원 소재를 공급 및 결합하는 방식에 따라서, 재료 압출 방식(Material extrusion), 분말 적층 용융 방식(Powder bed fusion), 광중합 방식(Vat photopolymerization), 재료 분사 방식(Material jetting), 스위트

적층 방식(Sheet lamination), 고에너지 직접 조사 방식(Direct energy deposition), 바인더 분사 방식(Binder jetting)으로 ASTM-F42에서 구분하고 있다 [1]. 그 중 바인더 분사 방식은 분말 상의 소재 위에 액상의 바인더를 선택적으로 분사하여 최종 제품을 제작하는 공정으로, 조형을 위한 틀이 요구되지 않고 재료 낭비를 줄이면서 복잡한 구조물을 제작할 수 있다 [2]. 이러한 장점들로 인해 주조산업에서 주형 및 중차 제작에 Binder jetting 방식을 적용하기 위한 다양한 연구가 계속해서 진행되고 있다 [3-5].

BJ(Binder jetting) 방식을 이용한 글로벌 3D 프린팅 기업들은 페놀(Phenol) 또는 푸란(Furan) 계열의 유기바인더를 사용한다 [6]. 유기바인더로 제조된 주형은 강도가 높다는 장점이 있지만 [7], 주형 제작 및 주조 과정에서 휘발성 유기화합물(Volatile organic compounds; VOCs)과 독

- 편성은: 석사, 박대원: 교수, 이만식·백재호: 연구원

*Corresponding Author: Jae Ho Baek

[Tel: +82-52-980-6632, E-mail: jhbaek@kitech.re.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

성 물질이 발생하는 큰 단점을 가지고 있다. 이는 다량의 발암 물질을 야기하기 때문에, 환경성, 안정성, 작업성을 고려한 친환경 무기바인더 개발이 필요하다 [3,8]. 기존 주조 공정에서 사용하는 규산나트륨(Sodium silicate solution) 기반의 무기바인더는 고온에서 탈수 반응에 의해 주조가 가능한 특성을 발현하기 때문에 3D 프린팅용 무기바인더로의 적용이 적절하다. 그러나, 규산나트륨 기반의 무기바인더를 3D 프린팅에 적용함에 있어서 프린팅 헤드(Printing head)에 적용하여 토출되는 바인더 액적의 특성을 연구한 사례는 거의 없는 실정이다.

3D 프린팅에서 바인더 분사 방식은 필요할 때만 액적을 형성시키는 드롭 온 디맨드(Drop-on-demand; DOD) 프린팅 방식이 사용되며, 헤드에서의 토출 방식에 따라 전열 방식(Thermal actuation)과 피에조 방식(Piezoelectric actuation)으로 구분된다. 피에조 방식의 경우 바인더 토출 시에 설정된 전압과 펄스 조건이 토출 액적의 거동에 영향을 미치게 되는데, Y. Zhong 등에 따르면 토출 전압과 펄스 폭(Pulse width)이 높을수록 토출 액적의 속도, 길이(Jet length) 및 위성 액적(Satellites)이 증가하는 경향이 있는 것으로 보고하고 있다 [9]. 특히 위성 액적은 주 액적 외 생성되는 액적으로 원하는 위치에 떨어지지 못하고 프린팅 품질을 떨어뜨리는 요인이 되며, 이에 따라 바인더 물성에 따른 적절한 토출 전압 및 펄스 폭의 최적화가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 바인더 분사 방식의 3D 프린팅으로 주형 제작을 위해 프린팅 헤드에 적합한 무기바인더의 규산나트륨 함량 및 토출 조건에 따른 액적 거동에 대한 연구를 진행하였다. 피에조 방식의 헤드에서 토출 전압 및 펄스 폭을 조정하여 안정한 액적이 형성되는 조건을 확인하였고, 프린팅 헤드의 노즐 막힘을 방지하기 위해, 첨가제를 첨가하였다. 또한 토출 액적의 거동을 예측하기 위해 오네소지 수(Ohnesorge Number; Oh)를 도입하여 안정한 액적이 형성되는 값의 범위를 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 재료

본 연구에서는 무기바인더의 원료로 규산나트륨(Sodium silicate solution, KS M 1415 Type 3, Acenanochem., Korea)을 사용하였다. 프린팅 헤드에서 노즐막힘을 방지하기 위해서 에틸렌글리콜(Ethylene glycol; EG, Purity: >99.5%, Daejung Chemicals & Metals Co. Ltd., Korea)과 글리세롤(Glycerol; Gly, Purity: >99.0%, Daejung Chemicals & Metals Co. Ltd., Korea)을 첨가

Fig. 1. TGA curve for sodium silicate solution.

제로 사용하였다. 본 실험에서 사용한 모든 시약은 정제하지 않고 그대로 사용하였다. 용액 제조 시 사용된 용매는 2차 증류수를 사용하였다.

본 연구에 적용되는 무기바인더의 경우 최대 강도를 가지는 온도가 150 °C이므로 이를 기준으로 고형분의 함량을 계산하였다. 그림 1의 TGA 결과로부터 150 °C에서 무기바인더(SSS)의 고형분이 50 wt%임을 확인하였다. 무기바인더를 피에조 방식의 프린팅 헤드에서 토출이 잘 되는 점도범위로 조절하기 위해 고형분의 함량을 25 ~ 40 wt%가 되도록 1시간 동안 교반하여 희석하였다. 프린팅 헤드에서 건조특성을 개선하기 위하여, 에틸렌글리콜(ethylene glycol)과 글리세롤(glycerol)을 함량별(10, 20, 30 wt%)로 첨가하여 토출 특성을 확인하였다. 또한, 각 제조되어진 바인더의 오네소지 수를 계산하여 적용여부를 검토하였다.

2.2. 물리적 특성 평가

실험에 사용된 샘플의 물리적 특성에 따른 토출 액적 분석 및 오네소지 수를 계산하기 위해서 점도, 표면장력 및 밀도를 분석하였다. 점도는 DV2T Viscometer (Brookfield, U.S.A.)에 ULA-31(E)Y Spindle과 ULA-40Y Water jacket을 사용하여 토크범위(Torque range) 80 ~ 100% 범위에서 측정하였다. 표면장력은 드누이 장력계(Du Nouy tensiometer; 20 Tensiometer, Kruss, Germany)를 이용하여 Du Nouy ring method로 측정하였고, 밀도는 아르키메데스 방식(Archimedes method)으로 AD-1653과 GR-200 (A&D, Japan)을 이용하여 측정하였다. 또한, 습윤제 첨가에 따른 바인더의 건조특성을 확인하기 위해 실린지 펌프(kd scientific LEGATO® 100 syringe pump)를 이용하여

PTFE(Polytetrafluoroethylene) 기판에 4 μ L의 바인더 액적을 적가하고 시간 경과에 따른 액적의 변화를 관찰하였다.

2.3. 토출 특성 평가

본 연구에서는 토출 액적의 특성을 분석하기 위해 피에조 방식으로 16개 노즐 및 21.5 μ m 직경의 DMC-11610 (FUJIFILM Dimatix Inc., U.S.A.) 상용 프린트 헤드가 장착되어진 옴니젯 100 프린터(Omnijet 100 printer, Unijet, Korea)를 사용하여 토출성 평가를 진행하였다.

옴니젯 100 프린터는 피에조 방식의 잉크젯 프린터로써 피에조 압전체에 가하는 토출 조건이 다양한 액적을 형성시킬 수 있다. 토출 평가를 위해서 사용된 파형(Waveform)은 그림 2에 나타내었다. 토출 조건은 토출 진동수(Jetting frequency)를 500 Hz, DPI(Dots per inch)를 200으로 고정하고, 토출 전압을 10 ~ 40 V(최대 허용 전압), 전압을 인가하는 시간인 펄스 폭(Pulse width = Rise time + Dwell time + Fall time)의 상승 시간(Rise time)과 하강 시간(Fall time)을 각각 2 μ s로 고정하고 휴지 시간(Dwell time)만을 4 ~ 10 μ s로 설정하여 토출 조건에 따른 액적의 거동 분석 및 토출 조건 최적화를 실시하였다.

Fig. 2. Waveform for droplet formation.

2.4. Z 값(Z value)

Z 값(Z value)은 오네수지 수의 역수($1/Oh$)로 표현되며 액체의 물성에 따른 토출 액적의 거동을 수치적으로 예측할 수 있는 수식으로, 액체의 점도 (μ , cP), 표면장력 (σ , mN/m), 밀도 (ρ , g/mL) 그리고 노즐의 직경 (L , m)으로 Z 값을 계산할 수 있다 [10-12]. 낮은 Z 값을 가지는 액체는 액적 형성이 되지 않거나 액적의 꼬리가 늘어지는 경향이 있고, 높은 Z 값을 가지는 액체는 토출되는 주 액적(Primary droplet) 외의 위성 액적(Satellite droplet)을 수반하는 경향이 있다.

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}} = \frac{\sqrt{We}}{Re} = 1/Z \quad (1) [12]$$

- μ is the dynamic viscosity of the liquid
- σ is the surface tension
- ρ is the density of the liquid
- L is the characteristic length scale (typically drop diameter)
- Re is the Reynolds number
- We is the Weber number

3. 결과 및 고찰

3.1. 고형분이 바인더의 액적 형성에 미치는 영향

Z 값을 이용하여 바인더 물리적 특성에 따른 액적의 형상을 예측하고, 피에조 방식의 프린터의 토출 조건에 따른 액적의 형상을 실험적으로 분석하였다. Z 값에 대하여 B. Derby 등은 CFD (Computational fluid dynamics) 모델링을 이용하여 Z 값이 $1 < Z < 10$ 사이일 때 토출 액적이 안정한 액적을 형성한다고 보고하였고 [10], I. H. Choi 등은 공압 방식의 프린팅 시스템에 글리세롤 혼합물을 사용하여 안정한 액적이 형성될 수 있는 범위를 $0.23 < Z < 84.77$ 으로 보고하였다 [11]. 본 실험에서는 최적화된 바인더의 함량과 토출 조건에서 바인더의 물성이 변했을 때 안정한 액적을 형성할 수 있는 Z 값의 범위를 확인하였으며, 사용된

Table 1. Physical properties and Z value by solid contents

Sample type (solid contents)	Viscosity (cP)	Surface tension (mN/m)	Density (g/mL)	Z value	Remark
SSS(50%)	59.16	76.30	1.3455	0.79	SSS
SSS(40%)	10.37	73.23	1.2807	4.33	40S
SSS(30%)	3.96	73.47	1.2002	11.00	30S
SSS(25%)	2.86	73.77	1.1745	15.09	25S

Fig. 3. Droplet formation ejected at various voltages; (A) 40S, (B) 30S, and (C) 25S.

샘플의 물리적 특성과 계산되어진 Z 값은 표 1과 같다.

그림 3은 토출 전압이 10 V에서 40 V까지 인가되었을 때 무기바인더(SSS)의 고형분에 따른 토출 액적의 거동을 나타낸다. 실험에 사용된 바인더들은 전체적으로 토출 전압 10 V에서 토출이 되지 않았지만, 고형분 함량이 25 wt%인 25S의 경우 토출 전압 20 V 이상에서 액적이 형성되었다. 상대적으로 고형분 함량이 많은 30S와 40S의 경우 30 V 및 40 V의 높은 토출 전압에서 액적 형성이 가능하였고 고형분 함량이 증가할수록 액적 형성을 위해서 더 높은 토출 전압이 요구되었다. 또한 최대 허용 전압인 40 V에서의 고형분 함량별 토출 특성은 $25S > 30S > 40S$ 순으로 낙하속도(drop velocity)가 빨라졌다. 즉 고형분 함량이 많을수록 충분한 토출 전압이 적용되지 못할 경우에 토출 액적의 운동에너지가 소실되어 액적이 형성되지 못한 것으로 사료되며, 이는 토출 전압 40 V에서 고형분 함량이 높은 40S의 낙하속도가 가장 느렸던 것으로 확인할 수 있다. 따라서 고형분 함량이 증가할수록 액적 형성을 위해 더 많은 구동력이 요구됨을 확

인하였다.

바인더의 물성별로 계산된 Z 값은 SSS와 40S는 각각 0.79 및 4.33으로 나타났고, 30S와 25S는 각각 11.00 및 15.09로 상대적으로 높은 Z 값을 가진다. 이러한 Z 값에 따른 특징은 그림 3에서 토출 전압 40V로 경계 조건이 고정된 상태에서 토출된 액적으로부터 각각의 형태를 확인할 수 있다. Z 값이 가장 낮은 SSS는 액적 형성이 불가능하였고 40S는 토출되는 액적의 꼬리가 길어지는 현상이 관찰되었다. 또한, 상대적으로 높은 Z 값을 가지는 30S와 25S는 토출되는 주 액적 외의 위성 액적을 수반하였으며, 이는 2.4절에서 언급한 Z 값의 경향과 일치함을 확인하였다. 특히, Z 값이 0.79 및 4.33인 바인더에서 나타난 결과는 점도에 의한 영향이 지배적으로 작용하여 점성 소실(Viscous dissipation)에 의한 액적 형성 불가 및 액적의 꼬리가 길어졌고, 반면 Z 값이 11.00 및 15.09인 바인더는 표면장력에 의한 영향이 지배적으로 작용하여 토출 액적이 최소한의 표면적을 가지려하기 때문에 다량의 위성 액적을 형성시킨 것으로 판단된다.

Fig. 4. Droplet formation from 25S ejected at various voltages and dwell time.

3.2. 토출 조건에 따른 액적 형성

피에조 방식의 프린팅 헤드는 토출 전압과 펄스 폭이 액적 형상에 영향을 미치는 토출 변수가 된다. Y. Zhong 등에 의하면 토출 전압과 펄스 폭이 증가할수록 토출 액적의 꼬리가 길어지거나 주 액적이 분리되면서 형성되는 위성 액적이 증가하는 것으로 보고하였다 [9]. 따라서 이러한 토출 변수들을 고려하여 안정적인 토출뿐만 아니라 안정한 액적이 형성될 수 있는 조건에 대한 최적화가 요구된다. 그림 4는 다양한 토출 전압 범위에서 토출이 가능하였던 무기바인더의 고형분의 함량이 25 wt%인 25S에 대하여 토출 전압 및 펄스 폭의 휴지 시간(Dwell time)을 조절함에 따른 토출 액적의 거동을 나타낸다. 토출 전압에 따른 특징은 토출 전압 10 V에서는 25S의 액적이 형성되지 않았고, 인가되는 토출 전압이 20 V 이상에서는 안정적인 토출이 가능하였다. 토출 전압이 20 V에서 40 V로 증가함에 따라서 주 액적의 낙하 속도가 증가하였고, 노즐에서 토출되는 액적의 꼬리가 더욱 길어져 이는 다량의 위성 액적

형성에 관여하였다. 펄스 폭의 휴지 시간 변화에 따른 토출 결과에서는 시간이 증가함에 따라서 추가적인 위성 액적이 형성되었고, 주 액적의 낙하 속도가 증가함을 확인하였다.

토출 전압과 펄스 폭은 액적 형성에 구동력으로 작용하기 때문에 필요 이상의 구동력이 작용할 경우에는 주 액적을 제외한 위성 액적이 추가적으로 형성되고, 토출 전압 10 V와 같이 충분하지 못한 구동력이 작용되었을 경우에는 액적 형성이 되지 않아 토출성이 불량해지는 결과를 초래한다. 또한, 토출 액적의 꼬리가 길어지면 노즐에서 액적이 끊어질 때 주 액적이 원하는 곳에 떨어지지 못하게 되어 위치 결정 정도(Positioning accuracy)에 영향을 미치게 되고, 위성 액적이 형성될 경우에는 주 액적 외의 추가적인 액적이 원하지 않는 곳에 분사되어 프린팅 해상도(Printing resolution)에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [13]. 따라서 토출 액적의 안정성은 3D 프린팅 방식으로 제조된 주형의 치수정밀도(Dimensional accuracy) 및 기계적 특성에 영향을 미치는 중요한 요인이 되기 때문에, 토

Table 2. Physical properties and Z value by prepared inorganic binders

Sample type (solid contents)	Viscosity (cP)	Surface tension (mN/m)	Density (g/mL)	Z value	Remark
SSS(25%) + EG(10%)	4.28	64.70	1.1772	9.45	25S_10EG
SSS(25%) + EG(20%)	6.83	59.48	1.1925	5.72	25S_20EG
SSS(25%) + EG(30%)	11.35	59.34	1.2076	3.46	25S_30EG
SSS(25%) + Gly(10%)	4.47	70.18	1.1922	9.49	25S_10Gly
SSS(25%) + Gly(20%)	8.12	70.24	1.2232	5.29	25S_20Gly
SSS(25%) + Gly(30%)	16.02	69.50	1.2525	2.70	25S_30Gly

Fig. 5. Time-dependent images of the 4μL 25S droplet and 25S droplets with different humectant during the natural evaporation on the PTFE surface; (a) 25S, (b) 25S_10EG, (c) 25S_30EG, (d) 25S_10Gly, and (e) 25S_30Gly.

출 전압 20 V와 휴지 시간 4 μs에서 25S 무기바인더가 안정적인 토출이 가능하고 안정한 액적 형성이 확보되었다.

3.3. 첨가제가 포함된 무기바인더의 물성변화에 따른 액적 형성

무기바인더는 공기 중의 이산화탄소에 노출 및 수분 증발에 의해서 스스로 경화되는 특징이 있기 때문에 [14,15],

프린팅 헤드의 노즐 막힘을 발생시킨다. 이는 바인더의 토출의 안정성과 재현성에 영향을 미치는 요인이 된다. 이를 개선하기 위해 잉크젯 프린팅에서 노즐 막힘 개선용으로 많이 사용하는 에틸렌글리콜 및 글리세롤을 습윤제(Humectant)로 첨가하여 그 특성(표 2)을 보았다. 습윤제는 강한 수소 결합을 형성함으로 용매 증발을 최소화시켜 건조를 늦추는 것으로 알려져 있다 [16]. 그림 5는

Fig. 6. Droplet formation ejected at 20 V and 4 μ s; (a) 25S_10EG, (b) 25S_20EG, (c) 25S_30EG, (d) 25S_10Gly, (e) 25S_20Gly, and (f) 25S_30Gly.

습윤제의 영향을 보기 위해 소수성 표면을 가지는 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 기판에 에틸렌글리콜 및 글리세롤이 첨가된 무기바인더를 4 μ L씩 적가하여 시간에 따른 무기바인더의 건조 특성을 관찰한 결과이다. 25S는 시간경과에 따라 수분 증발과 함께 액적의 크기가 감소되었다. 반면에, 각각의 습윤제가 첨가된 25S는 시간경과에 따른 증발이 관찰되지만 습윤제의 함량이 증가할수록 수분 증발이 늦춰져 액적의 크기의 감소가 더디졌고, 각각의 습윤제가 무기바인더의 건조특성을 개선시키는 것을 확인하였다.

또한 습윤제 첨가에 따른 바인더의 물성은 습윤제의 함량이 증가할수록 25S 무기바인더의 점도 및 밀도가 증가하였고 표면장력은 감소하였다. 각각의 습윤제가 첨가된 25S의 물리적 특성에 대해 Z 값을 계산한 결과는 $2.70 < Z < 9.49$ 의 범위에 속하였다.

그림 6은 토출 전압 20 V와 휴지 시간 4 μ s에서 습윤제가 첨가된 25S의 토출 액적의 형태를 나타낸다. Z 값이 15.09인 25S가 단일 액적을 형성하는 토출 전압 20 V와 휴지 시간 4 μ s의 토출 조건에서 토출 실험 결과, 습윤제가 첨가된 무기바인더들이 최적 토출 조건에서 전체적으로 단일 액적을 형성하였다. 이는 고형분 함량이 25 wt%인 무기바인더가 물리적 특성이 변하더라도 Z 값이 2.70에서 15.09에 속한다면 안정한 단일 액적이 형성될 수 있음을 의미한다. 따라서 본 실험에서는 토출 특성 개선을 위해 습윤제만을 첨가하였지만 적층 과정에 주형의 강도 및 내습성 개선을 위해 여러 가지 첨가제를 도입 시, 토출 전압 20 V 및 휴지 시간 4 μ s의 토출 조건과 개선된 25S의 물성이 $2.70 < Z < 15.09$ 에 해당한다면 단일 액적 형성이 가능하고 치수정밀도가 높은 주형을 제작할 수 있을 것으로

사료된다.

또한, Z 값이 2.70에서 15.09인 25S 기반의 무기바인더가 토출 전압 20 V 및 휴지 시간 4 μ s에서 안정한 단일 액적이 형성되었지만 표 1의 Z 값이 4.33인 40S와 Z 값이 11.00인 30S는 25S 기반의 무기바인더의 Z 값 범위에 속함에도 불구하고 최적화된 토출 조건에서 액적 형성이 되지 않아 Z 값을 적용할 수 없었다. 이는 최적화된 토출 조건이 고형분의 함량이 다른 40S 및 30S의 무기바인더에는 적합하지 않음을 의미하고, 고형분의 함량에 따른 액적의 거동을 예측하기 위해서는 토출 안정성이 확보되는 토출 조건이 우선적으로 설정되어야 Z 값을 적용할 수 있는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3D 프린팅 방식에 규산나트륨 기반의 무기바인더를 적용하기 위하여 고형분의 함량 및 토출 조건을 최적화하였고 제조된 바인더의 토출 액적의 거동을 분석하기 위해서 오네소지 수의 역수인 Z 값을 도입하여 최적화된 토출 조건에서 안정한 액적을 형성할 수 있는 범위를 검토하였다.

무기바인더의 고형분 함량에 따른 토출 특성은 고형분 함량이 많을수록 액적 형성을 위해서 더 높은 토출 전압이 요구되었다. 실험에 사용된 바인더들은 토출 전압 10 V에서는 전체적으로 액적 형성이 되지 않았고 최대 허용 전압 40 V에서 나타난 고형분 함량별 토출 액적은 25S > 30S > 40S 순으로 고형분의 함량이 낮을수록 낙하속도(Drop velocity)가 빨랐다. 이는 동일한 구동력이 작용했을 때 고

형분의 함량이 높을수록 토출 액적의 운동에너지가 더 많이 소실되어 낙하속도가 감소한 결과로 고형분의 함량에 따라서 요구되는 구동력의 범위를 확인하였다. 인가되는 토출 전압이 높을수록 주 액적의 낙하 속도가 증가하였고, 토출되는 액적의 꼬리가 길어져 다량의 위성 액적 형성에 관여하였다. 펄스 폭의 휴지 시간 증가에 따라서 토출 액적이 추가적인 위성 액적을 수반하였고, 주 액적의 낙하 속도가 증가함을 확인하였다. 토출 액적의 안정성은 3D 프린팅으로 제조된 주형 및 중자의 치수정밀도 및 기계적 특성에 영향을 미치는 요인이 되므로 안정한 단일 액적이 형성될 수 있는 최적 범위가 토출 전압 20 V와 휴지 시간 4 μ s임을 확인하였다. 프린터 헤드의 건조 특성을 해결하기 위해 습윤제를 첨가하여도 Z 값은 $2.70 < Z < 15.09$ 의 범위에서 최적화된 토출 조건에서 전체적으로 안정한 단일 액적을 형성하였다. 따라서, 오네소지 수의 역수인 Z 값을 도입하면 안정한 액적 형성 여부를 판단하여 토출 특성을 예측할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2019년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원(20000126), 산업통상자원부가 지원하는 산업기술혁신사업(10067386) 그리고 한국생산기술연구원의 기관주요사업 생산기술산업선도핵심기술개발사업 (KITECH EO200014)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

REFERENCES

1. ISO / ASTM52900-15, Standard Terminology for Additive

- Manufacturing – General Principles – Terminology, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org
2. N. Hawaldar and J. Zhang, *Int. J. Adv.* **97**, 1037 (2018).
3. M. Upadhyay, T. Sivarupan, and M. E. Mansori, *J. Manuf. Process.* **29**, 211 (2017).
4. D. Zhao, W. Guo, B. Zhang, and F. Gao, *Rapid Prototyp.* **25**, 62 (2018).
5. J. W. Oh, S. Nahm, B. M. Kim, and H. Choi, *Korean J. Met. Mater.* **57**, 227 (2019).
6. T. A. L. Neel, P. Mognol, and F. Y. Hascoet, *Rapid Prototyp.* **24**, 1325 (2018).
7. D. Snelling, C. Williams, and A. Druschitz, *SFF. Symp.*, 197 (2014).
8. R. Ramakrishnan, B. Griewel, W. Volk, D. Gunther, and J. Gunther, *Adv. Mat. Res.* **1018**, 441 (2014).
9. Y. Zhong, H. Fang, Q. Ma, and M. Dong, *J. Fluid Mech.* **845**, 378 (2018).
10. N. Reis and B. Derby, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* **625**, 117 (2000).
11. I. H. Choi, Y. K. Kim, S. Lee, S. H. Lee, and J. Kim, *J. Microelectromech. Syst.* **24**, 768 (2015).
12. G. H. McKinley and M. Renardy, *Phys. Fluids* **23**, 127101 (2011).
13. D. Jang, D. Kim, and J. Moon, *Langmuir* **29**, 2629 (2009).
14. Hartmut Polzin, Inorganic binders for mould and core production in the foundry, *SCHIELE & SCHON* (2014).
15. Y. B. Ryu and M. S. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **56**, 72 (2018).
16. S. D. Hoath, Fundamentals of inkjet printing: the science of inkjet and droplets, *Wiley* (2016).