

Effect of saturation level on dimensional accuracy and binder migration of porous alumina ceramics via binder jetting 3D printing

Jung-Hoon Choi[†]

Cross-Functional Ceramics R&D Group, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Icheon Branch, Icheon 17303, Korea

(Received July 15, 2026)

(Revised July 24, 2026)

(Accepted August 11, 2026)

Abstract The effect of binder saturation level on the dimensional accuracy and binder migration behavior of alumina compacts fabricated by binder jetting three-dimensional printing was quantitatively analyzed. Spherical α - Al_2O_3 powder with $D_{50} = 5.07 \mu\text{m}$ was printed at five core/shell saturation conditions of 100/200, 110/220, 130/260, 150/300, and 170/340 % using a ProJet 360 system. The X-Y dimensional deviation remained between 0.13 and 0.17 mm and showed no consistent dependence on the saturation level, whereas the Z-direction binder migration depth increased about 3.35-fold, from 0.184 to 0.616 mm, with increasing saturation. Surface roughness R_a and S_a correlated almost linearly with the Z-migration depth ($R > 0.99$). A Washburn analysis confirmed that the capillary infiltration time (about 7.4 ms) is far shorter than the layer drying time, so the migration depth is expected to increase in proportion to the dispensed binder volume. Relative to this proportional baseline, the migration depth increased linearly with saturation up to 150/300 %, then rose abruptly at 170/340 %, indicating an inflection between 150/300 % and 170/340 % that is attributed to percolation breakthrough.

Key words Binder jetting, Saturation level, Alumina ceramic, Capillary infiltration, Dimensional accuracy

바인더 젯팅 3D 프린팅을 활용한 다공성 알루미나 성형체 제조에서 포화도에 따른 바인더 거동 및 치수 정확도 분석

최정훈[†]

한국세라믹기술원 이천분원 산업기반융합소재연구단, 이천, 17303

(2026년 7월 15일 접수)

(2026년 7월 24일 심사완료)

(2026년 8월 11일 게재확정)

요약 바인더 젯팅 3D 프린팅으로 제조한 알루미나 성형체에서 포화도가 치수 정확도와 바인더 침투 거동에 미치는 영향을 정량 분석하였다. 구형 α - Al_2O_3 분말($D_{50} = 5.07 \mu\text{m}$)을 ProJet 360 시스템에서 100/200~170/340 %의 다섯 가지 core/shell 포화도 조건으로 인쇄하였다. X-Y 평면 치수 편차는 0.13~0.17 mm 범위에서 포화도와 상관을 보이지 않은 반면, Z 방향 침투 깊이는 0.184 mm에서 0.616 mm로 약 3.35배 증가하였고 표면 거칠기 R_a · S_a 는 침투 깊이와 강한 선형 상관($R > 0.99$)을 나타내었다. Washburn 분석으로 모세관 침투 시간(약 7.4 ms)이 layer 건조 시간보다 충분히 짧아 침투 깊이가 토출 바인더 양에 의해 결정됨을 확인하였다. 침투 깊이는 150/300 %까지 포화도에 따라 선형적으로 증가하였으나 170/340 %에서 급증하여 percolation breakthrough에 기인하는 것으로 추정되는 변곡점이 확인되었다.

[†]Corresponding author

E-mail: eunu@kicet.re.kr

Copyright © 2026 The Korean Association of Crystal Growth Open

Access article under the CC BY-NC 4.0 license

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

1. 서론

Binder jetting 3D printing은 분말층에 액상 바인더를 선택적으로 토출하여 입자 사이의 결합을 유도하는 적층 제조 기술이다[1]. 광경화 방식이나 압출 방식과 달리 분말층 자체가 지지체 역할을 하므로 복잡한 형상을 별도의 지지 구조 없이 만들 수 있으며, 광경화나 압출을 적용하기 어려운 세라믹 분말에도 적용할 수 있다[2,3]. 알루미늄, 실리카, 지르코니아 등 산화물계 세라믹을 대상으로 다공성 세라믹 필터, 경량 구조 부품, 구조용 코어, 의료용 임플란트 등의 응용 연구가 수행되어 왔다[4-7].

Binder jetting 3D printing 공정으로 제조한 세라믹 성형체의 품질은 분말의 흐름성·습윤성·충전성, 바인더 잉크의 점도와 표면장력 등 다양한 인쇄 공정 변수의 상호작용으로 결정된다[8-10]. 그러나 이들 변수의 상당수는 장비 제조사가 분말·바인더 조합에 맞춰 고정값 또는 권장값으로 제공하므로, 사용자가 실질적으로 제어 가능한 공정 변수는 바인더 saturation level과 층 건조 시간으로 제한되는 것이 일반적이다[11]. 이 중 saturation level은 분말층 공극 부피 대비 토출 바인더의 부피비로 정의되며, 분말층 내 바인더 분포와 모세관 침투 거동을 지배함으로써 치수 정확도, 형상 분해능, 그린바디 강도를 결정하는 지배적 인자로 작용한다[12].

Saturation level의 영향에 관한 기존 연구는 미세 알루미늄 분말의 인쇄 거동[13]과 geopolymers 분말의 압축강도·치수 정확도[14]를 대상으로 수행되었으며, saturation 변화가 그린바디 강도 및 소결 밀도에 미치는 영향도 일부 보고된 바 있다[15]. 그러나 saturation level 변화에 따른 X-Y 평면 치수 정확도와 Z 방향 바인더 침투 거동, 그리고 이들 거동과 분말층 내 모세관 침투 거동의 상관관계에 대한 정량적 분석은 알루미늄 소재 기반 binder jetting 3D printing 공정에서 거의 보고된 바 없다.

본 연구에서는 알루미늄 분말을 대상으로 binder jetting 3D printing 공정의 saturation level을 단계적으로 변화시키며, X-Y 평면 치수 정확도, Z 방향 바인더 침투 거동, 표면 품질의 변화를 정량적으로 분석하였다. 이를 바탕으로 saturation level이 성형체 품질에 미치는 영향을 분말 특성 및 모세관 침투로 해석하고, 본 분말계에 적합한 saturation level 운용 범위를 제시하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 분말 및 바인더 잉크

주 분말로는 평균 입도 $D_{50} = 5.07 \mu\text{m}$ 의 구형 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

분말(DHC Co., Ltd., Korea)을 사용하였다. 분말의 흐름성을 높이기 위해 친수성 fumed silica(Konasil K-90, OCI, Korea)를 0.5 wt% 첨가하였고, 그린바디 강도를 보강하기 위해 sodium silicate(Daejung Co., Ltd., Korea)를 5 wt% 첨가하였다[10]. 바인더는 PVA 기반 VisiJet PXL Clear(3D Systems, USA)를 사용하였으며, 인쇄 영역의 시각적 구분을 위해 청색 잉크를 4 wt% 혼합하였다.

2.2. 인쇄 장비 및 공정 변수

본 연구에서는 ProJet 360(3D Systems, USA) 3D 프린터를 사용하였다. 잉크젯 헤드는 직경 $25 \mu\text{m}$ 노즐이 304개 배치되어 있는 thermal-type이며 인쇄 해상도 X 방향 300 dpi·Y 방향 450 dpi, 적층 두께 $100 \mu\text{m}$ (고정)이다. 주요 공정 변수는 분말의 단위 부피당 바인더 분사량을 결정하는 saturation level로 설정하였다. 본 연구에 사용된 3D 프린터에서 saturation level은 소재 프로파일 내에서 시편 내부(core)와 외곽(shell)에 대한 백분율 값으로 정의되며, shell 값이 core 값의 2배로 자동 연동되어 실질적인 제어 변수는 core 값에 한정된다. 신규 소재 프로파일을 생성하여 core 값을 100, 110, 130, 150, 170 %의 다섯 수준으로 설정하였으며, 대응하는 shell 값은 각각 200, 220, 260, 300, 340 %이다. 이하에서는 각 조건을 core/shell 형식(예: 100/200 %, 170/340 %)으로 표기한다. 본 분말계의 겉보기밀도 1.48 g/cm^3 와 탭밀도 1.75 g/cm^3 [10]를 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 이론밀도(3.95 g/cm^3)로 나누면 분말층의 충전율은 약 37~44 % 범위로 추정된다.

2.3. 시편 설계

X-Y 평면의 치수 정확도와 Z 방향 바인더 침투 거동을 따로 측정하기 위해 두 종류의 시편을 설계하였다. 첫째 시편은 표면 외관과 거칠기를 관찰하기 위한 $30 \times 30 \times 5 \text{ mm}$ 평판형 시편이며, 다섯 가지 saturation 조건에서 인쇄하여 바인더가 침투한 인쇄 영역과 분말 상태의 비 인쇄 영역의 경계를 비교할 수 있도록 하였다. 둘째 시편은 X-Y 평면 치수와 Z 방향 침투 깊이를 한 시편에서 동시에 측정하기 위해 십자형 단면 노출 패턴을 적용한 구조이다. 측정점 4개($D_1 \sim D_4$)를 두었으며 설계 치수는 $D_1 = 13.50$, $D_2 = 15.00$, $D_3 = 10.00$, $D_4 = 16.30 \text{ mm}$ 이다(Fig. 1).

2.4. 후공정 및 측정

인쇄가 끝난 시편은 80°C 항온 건조기에서 24시간 건

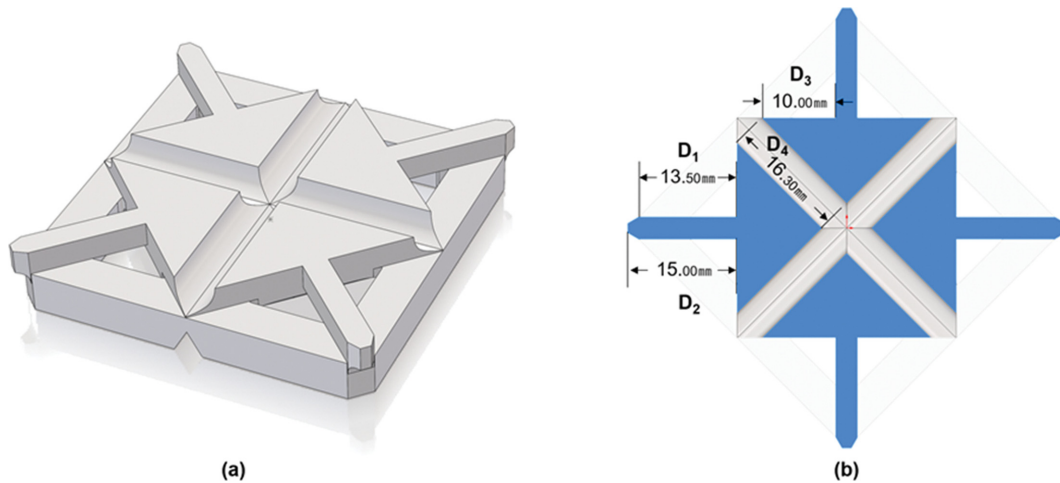


Fig. 1. Digital sketch of the cross-shaped sectioned specimen design. (a) isometric view (b) plan view with the four measurement points (D1~D4).

조한 뒤 압축 공기로 남은 분말을 제거하였다. 이후 X-Y 평면 치수, Z 방향 침투 깊이, 표면 거칠기를 측정하였다.

X-Y 평면 치수는 십자형 시편의 측정점 4개에 대해 광학 현미경(Axio Scope.A1, Carl Zeiss, Germany)으로 인쇄 영역의 외곽 치수를 측정한 뒤 설계 치수와의 편차로 구하였다. 각 saturation 조건에서 동일한 시편 4개에 대해 절대 편차의 평균과 표준편차, 부호를 그대로 둔 편차의 평균, 그리고 최대, 최소 편차 범위를 구하였다.

Z 방향 침투 깊이는 시편을 절단하여 청색 인쇄 영역의 측면 단면을 광학 측정하여 구하였다. 인쇄 영역의 Z 방향 외곽이 설계 외곽보다 더 확장된 깊이를 침투 깊이로 정의하였다. 침투 깊이는 각 조건에서 대표 시편의 절단 단면에 대해 측정하였다. 측정 값은 mm 단위로 표기하였으며, 적층 두께 100 μm 로 나누어 layer 수로도 함께 제시하였다.

표면 거칠기는 인쇄된 평판 표면을 레이저 현미경(OLS40-SU, Olympus Corporation, Japan)로 측정하여 R_a (line roughness)와 S_a (areal roughness)를 구하였다. 측정 영역은 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 로 통일하였다.

2.5. 모세관 침투 이론 분석

측정된 Z 방향 침투 거동을 정량적으로 해석하기 위해 Washburn 모세관 침투식을 적용하였다[16].

$$h = [r \gamma \cos\theta \cdot t / (2\eta)]^{1/2} \quad (1)$$

여기서 h 는 모세관 침투 깊이, γ 는 바인더 잉크의 표면장력, θ 는 분말층에 대한 잉크의 접촉각, r 은 분말층 모세관의 유효 반경, η 는 잉크 점도, t 는 침투 시간이다. 본 연구의 분말과 바인더 실측값($\gamma = 38.7 \text{ mN/m}$, $\theta =$

21.32° , $\eta = 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)을 식(1)에 대입하였다. 접촉각은 액적 분석기(Phoenix PHX-300, Surface Electro Optics, Korea)로 분말층에 1 μl 의 바인더 액적을 적하하여 측정하였으며[10], 표면장력은 Du Noüy ring법 기반 표면장력계(DST-60, Surface Electro Optics, Korea), 점도는 회전식 레오미터(HAAKE MARS III, Thermo Fisher Scientific, Germany)로 25°C 에서 측정하였다. 모세관 유효 반경 r 은 D_{50} 입자가 고르게 충전된 상태에서 입자 사이 공극의 등가 반경에 해당하며, fumed silica 첨가로 조밀하게 충전되는 점을 고려하여 $r = 0.25 \times D_{50} = 1.27 \mu\text{m}$ 로 설정하였다[17].

Washburn식은 바인더가 무한히 공급된다고 가정하므로, 침투 시간 t 가 고정되면 침투 깊이 h 는 토출된 바인더의 양과 관계없이 일정한 값으로 수렴한다. 따라서 식(1)을 침투 깊이를 직접 예측하는 식으로 쓸 수는 없다. 본 연구에서는 식(1)을 모세관 침투에 걸리는 시간이 layer 건조 시간보다 충분히 짧은지를 확인하는 데 사용하였다. 모세관 침투가 건조보다 충분히 빨리 끝난다면 토출된 바인더는 건조가 시작되기 전에 모두 분말층으로 침투하므로, 침투 깊이는 공급된 바인더의 양에 의해 결정된다. 단위 면적당 토출되는 바인더의 양은 saturation level에 비례하므로, 이 경우 침투 깊이도 saturation level에 비례한다고 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Saturation level에 따른 X-Y 평면 치수 정확도

다섯 가지 saturation 조건에서 인쇄한 십자형 시편의 광학 이미지를 Fig. 2에 나타내었다. 각 패널의 원숫자

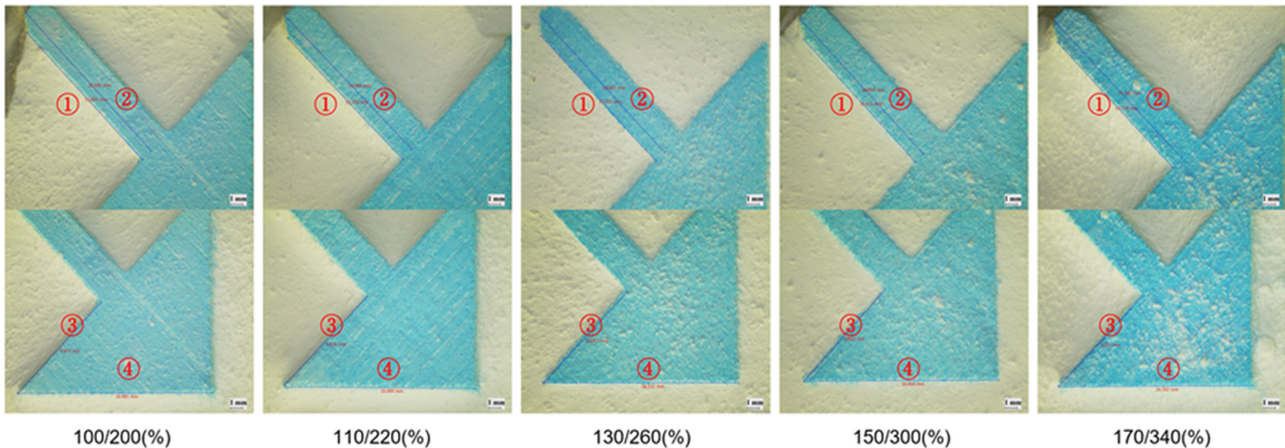


Fig. 2. Optical images of the cross-shaped specimens printed at each saturation condition. Circled numbers ①~④ indicate the four measurement points D1~D4 defined in Fig. 1(b). Scale bars: 1 mm (all panels).

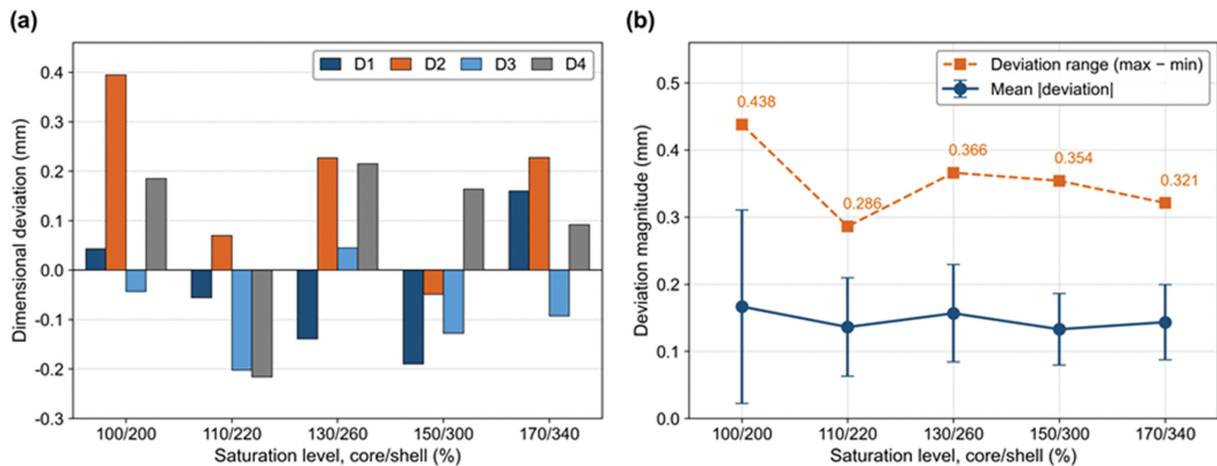


Fig. 3. X-Y dimensional deviation of the cross-shaped specimens. (a) signed deviation at each measurement point (D1~D4) (b) mean absolute deviation with standard deviation and the max-min deviation range for each saturation condition.

①~④는 Fig. 1(b)에 정의한 측정점 D1~D4의 위치를 나타낸다.

Figure 3(a)는 각 측정점이 설계 치수에서 벗어난 정도를 점별·조건별로 정리한 결과이며, Fig. 3(b)는 같은 데이터를 saturation 조건별 절대 편차의 평균과 표준편차, 그리고 최대, 최소 편차 범위로 종합한 결과이다.

Figure 3(b)에서 절대 편차의 평균값은 0.13~0.17 mm 범위에 머물렀고, saturation이 증가해도 일정하게 늘거나 줄지 않았다. 편차 범위도 110/220 % 조건에서 0.286 mm로 가장 작았으나 나머지 네 조건에서는 0.32~0.44 mm 사이에서 변동하여 saturation level과 뚜렷한 관계를 보이지 않았다. 즉 X-Y 평면 치수 편차의 크기는 saturation level 변화에 둔감하다.

편차의 부호를 보면 양의 편차가 음의 편차보다 크기가 컸다. 100/200 % 조건의 측정점 편차는 +0.395 mm에서 -0.043 mm까지, 170/340 % 조건은 +0.228 mm에서 -0.093 mm까지 분포하여 두 조건 모두 양의 방향으

로 치우쳤다. 이는 인쇄 영역이 설계 치수보다 평균적으로 조금 커지는 경향이 있음을 뜻하며, 토출된 바인더가 설계 경계를 넘어 X-Y 방향으로 퍼지기 때문으로 해석된다. 다만 변화량은 saturation level에 따라 일정하게 관찰되지는 않았다.

X-Y 평면의 인쇄 정확도는 잉크 액적의 분사 위치 정밀도, 액적이 분말층 표면에 닿았을 때 X-Y 방향으로 퍼지는 거리와 분말층 표면의 습윤성으로 결정된다[1]. 이들은 saturation level과 직접 연결되지 않는다. Saturation level이 높아지면 단위 부피당 토출되는 바인더의 총량은 늘지만, 액적 하나가 X-Y 방향으로 퍼지는 거리는 그에 비례해 변하지 않는다. 따라서 본 실험에서 나타난 0.13~0.17 mm 수준의 X-Y 편차는 saturation의 함수가 아니라, 본 분말-바인더와 ProJet 360 잉크젯 헤드 자체의 한계 분해능에 가까운 값으로 해석된다. 인쇄 영역이 조금 커지는 경향은 이 한계 분해능 위에 더해진 작은 성분으로 볼 수 있다.

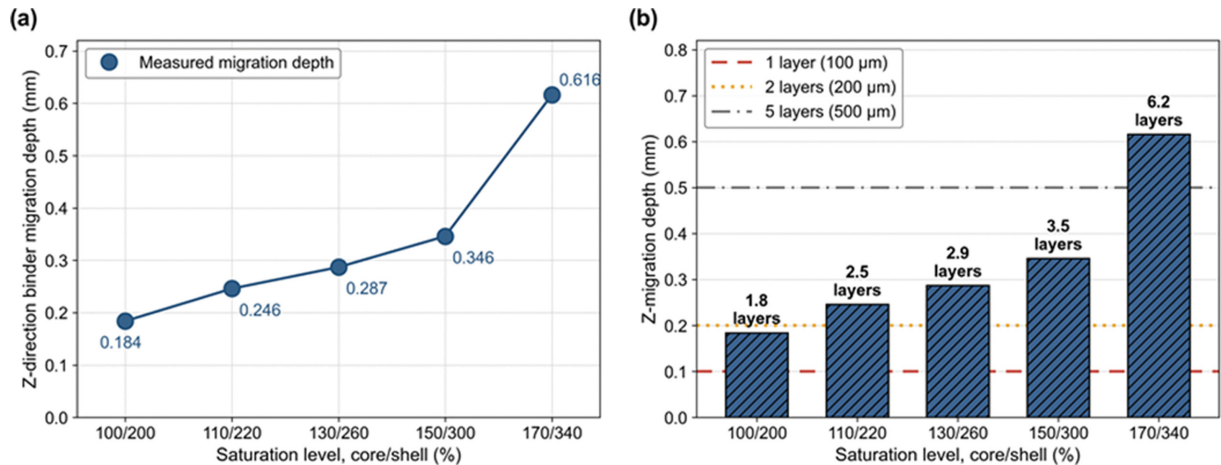


Fig. 4. Z-direction binder migration depth as a function of saturation level. (a) absolute migration depth; (b) migration depth expressed in layer counts (layer thickness = 100 μm) with reference lines. Migration depth was measured on a representative sectioned specimen per condition.

3.2. Saturation level에 따른 Z 방향 바인더 침투 거동

Saturation level이 Z 방향 바인더 침투 깊이에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Figure 4(a)는 saturation 조건별 절대 침투 깊이를, Fig. 4(b)는 같은 깊이를 적층 두께 100 μm로 나누어 layer 수로 환산한 것이다.

Z 방향 침투 깊이는 saturation level이 높아짐에 따라 100/200 % 조건의 0.184 mm에서 170/340 % 조건의 0.616 mm까지 약 3.35배 증가하였다. 100/200 %에서 150/300 %까지는 완만하게 증가한 반면 170/340 %에서 급격히 증가하여 증가율이 일정하지 않았다. 침투 깊이를 layer 수로 환산하면 100/200 % 조건에서도 1.8 layer였으며, saturation이 높아짐에 따라 2.5, 2.9, 3.5 layer로 늘어 170/340 % 조건에서는 6.2 layer에 이르렀다. 모든 조건에서 바인더가 인쇄된 layer를 넘어 하부 layer까지 확장되었다. Z 방향 형상 분해능의 한계가 적층 두께 100 μm가 아니라 바인더 침투 거동으로 결정됨을 보여준다.

모세관 침투가 단위 layer 건조보다 빨리 종료되는지 확인하기 위해 식(1)을 응용하였다. 가장 낮은 조건(100/200 %)의 측정 침투 깊이 0.184 mm를 대입하여 침투 시간 t 를 역산한 결과 약 7.4 ms가 도출되었다. 이는 액적 착탄 후 침투가 ms 수준에서 완료된다는 보고와 부합하며[18], 분당 2~4 layer의 인쇄 속도[10]를 기준으로 약 15~30초인 layer당 인쇄-건조 주기보다 훨씬 짧다. 식(1)에서 침투 시간은 $t \propto 1/r$ 이므로 r 을 $0.15 \sim 0.35 \times D_{50}$ 범위로 가정하더라도 역산 침투 시간은 약 5~12 ms에 머물러, 이 판단은 r 선택에 민감하지 않다. 따라서 모세관 침투는 건조가 시작되기 전에 종료된다. 침투가 건조 전에 완료되면 토출된 바인더가 모두 분말층으로 유입되므로, 침투 깊이는 saturation level에 비례한다.

침투 깊이는 100/200 %에서 150/300 %까지 saturation

level에 따라 선형적으로 증가하였으며, 이 구간에서는 모세관 침투가 주된 구동력으로 판단된다. 170/340 %에서는 침투 깊이가 이 경향을 벗어나 급증하였다. 100/200 % 조건 기준 공급량 비례를 적용한 170/340 %의 기대 침투 깊이는 약 0.31 mm, 100/200~150/300 % 구간의 선형 추세를 외삽한 기대값은 약 0.41 mm이나 실측값은 0.616 mm로 두 기대값을 모두 크게 상회하였으며, 150/300 %와 170/340 % 사이에 변곡점이 존재함이 확인되었다. 다만 변곡점의 위치는 측정 조건 간격의 한계로 두 조건 사이 구간으로만 특정되며, 구간 내 정확한 위치는 추가 조건의 실험으로 확인할 필요가 있다. 이 변곡은 분말층에 형성된 젖은 경로를 따라 바인더가 모세관 압력의 제약 없이 유입되는 percolation breakthrough에 기인하는 것으로 추정된다[19]. 이 영역에서는 saturation level이 조금만 높아져도 침투 깊이가 급증하여 공정 제어성이 저하된다. 변곡점의 위치는 분말층 충전 밀도, 모세관 반경, 잉크 표면장력 등 분말-바인더에 따라 달라지므로 본 알루미늄 분말에 한정된 결과로 보아야 한다.

3.3. 표면 거칠기와 침투 깊이의 상관성

Saturation level이 인쇄 시편의 표면 거칠기에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었다. Figure 5(a)는 line roughness R_a 와 areal roughness S_a 를 saturation 조건별로 비교한 결과이며, Fig. 5(b)는 표면 거칠기와 Z 방향 침투 깊이의 관계를 나타낸 것이다.

R_a 와 S_a 는 모두 saturation level이 높아짐에 따라 꾸준히 늘었다. R_a 는 100/200 % 조건의 8.2 μm에서 170/340 % 조건의 24.7 μm로 약 3.0배, S_a 는 7.4 μm에서 21.8 μm로 비슷한 비율로 증가하였다. 표면 거칠기를 Z 방향 침투 깊이의 함수로 나타낸 결과(Fig. 5(b)), R_a 와

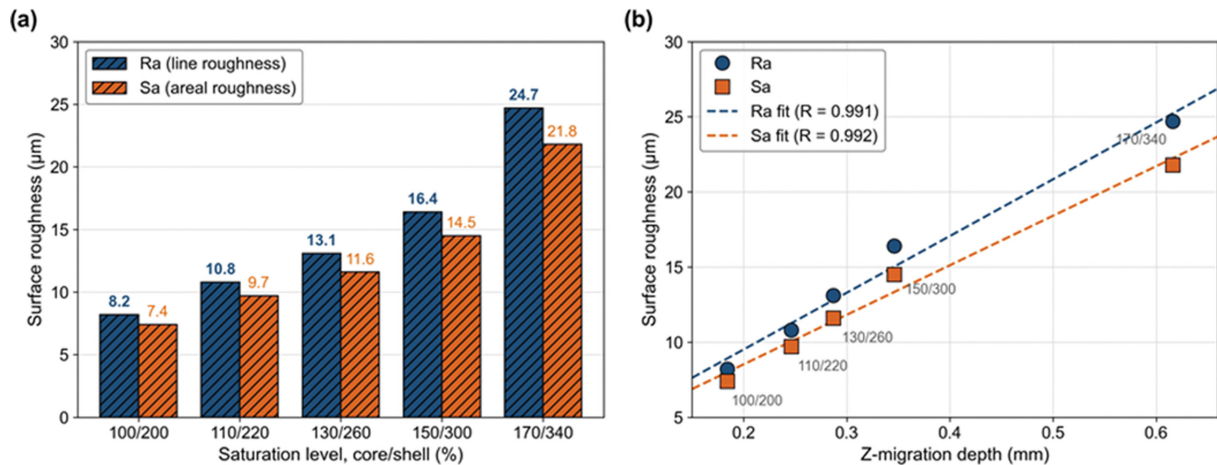


Fig. 5. Surface roughness of the printed specimens. (a) Ra and Sa for each saturation condition; (b) Ra and Sa as a function of Z-migration depth with linear fits ($n = 5$).

Sa 모두 침투 깊이와 강한 선형 상관을 보였으며 상관계수 R 은 각각 0.991, 0.992로 확인되었다.

이 상관성은 두 현상이 같은 원리에서 비롯되기 때문이다. 잉크 액적이 분말층에 닿으면 모세관 작용으로 분말 사이 공극으로 침투하는데, 단위 면적에 공급되는 바인더 부피가 클수록 침투 깊이가 깊어지는 동시에 표면에서 분말 입자를 끌어들이거나 들뜨게 하는 효과도 커진다[1]. 또한 토출된 바인더는 건조수축에 의해 표면 구조 변형을 초래한다. 따라서 Z 방향 침투 깊이의 증가와 표면 거칠기의 증가는 모두 단위 면적당 토출되는 바인더 부피가 늘어난 결과이며 동일 인자에 의해 지배된다.

본 결과는 Z 방향 분해능의 저하가 형상 정밀도뿐 아니라 표면 품질에도 직접 영향을 준다는 것을 보여준다. 후속 코팅 공정의 균일성, 다공성 필터의 분리 효율, 정밀 부품의 표면 마감 품질처럼 표면 거칠기에 민감한 응용에서는 saturation level의 선택이 형상 분해능과 표면 품질을 함께 결정하는 변수가 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 ProJet 360 binder jetting 시스템에서 알루미나 성형체의 saturation level을 다섯 단계로 변화시키며 X-Y 평면 치수 정확도, Z 방향 바인더 침투 깊이, 표면 거칠기를 정량 분석하였다.

X-Y 평면 치수 편차는 0.13~0.17 mm 범위에서 saturation level과 상관을 보이지 않아, 잉크젯 헤드의 액적 분사 정밀도와 분말층 습윤성이 지배하는 한계 분해능으로 해석된다. 반면 Z 방향 침투 깊이는 0.184 mm에서 0.616 mm로 약 3.35배 증가하였고 가장 낮은 조건에서도 적층 두께의 1.8배에 이르러, Z 방향 형상 분해능은 적층 두께가 아니라 바인더 침투 거동으로 결정된다. 표면 거

칠기 Ra와 Sa는 침투 깊이와 강한 선형 상관($R > 0.99$)을 보여, 두 증가가 단위 면적당 토출 바인더 부피라는 동일 인자에서 비롯됨을 확인하였다.

Washburn 분석으로 모세관 침투 시간(약 7.4 ms)이 layer 건조 시간보다 충분히 짧음을 확인하였으며, 침투 깊이는 150/300 %까지 saturation level에 따라 선형적으로 증가한 뒤 170/340 %에서 급증하여 두 조건 사이에 percolation breakthrough에 기인하는 것으로 추정되는 변곡점이 확인되었다.

따라서 saturation level은 X-Y 분해능에는 거의 영향을 주지 않으면서 Z 방향 분해능과 표면 품질을 함께 결정하는 공정 변수이며, 표면 품질이 중요한 응용에서는 침투 깊이가 선형적으로 증가하는 구간에서 운용하는 것이 공정 제어에 유리하다. 다만 급증 거동은 170/340 % 단일 조건에서 관찰된 것으로, 분말 입도·입형에 따른 변곡점 변화와 core-shell 독립 제어 조건에서의 침투 거동은 후속 연구로 규명할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(RS-2024-00469381, 반도체 후공정 광학검사장비용 600 × 600 mm² 이상 대면적 세라믹 스테이지 제조 기술 개발) 및 한국세라믹기술원 기본연구사업(KFB25004, Binder Jetting 3D Printing 기술을 활용한 세라믹 습식 프레스 몰드 코어 제조 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- [1] A. Mostafaei, A.M. Elliott, J.E. Barnes, F. Li, W. Tan,

- C.L. Cramer, P. Nandwana and M. Chmielus, "Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges", *Prog. Mater. Sci.* 119 (2021) 100707.
- [2] X. Lv, F. Ye, L. Cheng, S. Fan and Y. Liu, "Binder jetting of ceramics: Powders, binders, printing parameters, equipment, and post-treatment", *Ceram. Int.* 45 (2019) 12609.
- [3] M. Ziaee and N.B. Crane, "Binder jetting: A review of process, materials, and methods", *Addit. Manuf.* 28 (2019) 781.
- [4] C.L. Cramer, B.L. Armstrong, A. Trofimov, P. Wang, D. Siddel, H. Wang, E. Cakmak, J. Klett and A. Elliott, "Alumina-based filters made via binder jet 3D printing of alumina powder, colloidal silica infiltration, and sintering", *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* 18 (2021) 1960.
- [5] A. Zocca, P. Colombo, C.M. Gomes and J. Günster, "Additive manufacturing of ceramics: Issues, potentialities, and opportunities", *J. Am. Ceram. Soc.* 98 (2015) 1983.
- [6] E.-H. Cho, K.-S. Suh, S.-H. Kim, M.-C. Shin, B.-K. Shin, J.-S. Kim and H.-S. Lee, "Efficiency of catalyst-coated ceramic filter with acid treatment", *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* 18 (2008) 91.
- [7] W. Du, M. Singh and D. Singh, "Binder jetting additive manufacturing of silicon carbide ceramics: Development of bimodal powder feedstocks by modeling and experimental methods", *Ceram. Int.* 46 (2020) 19701.
- [8] S. Barui, H. Ding, Z. Wang, H. Zhao, S. Marathe, W. Mirihanage, B. Basu and B. Derby, "Probing ink-powder interactions during 3D binder jet printing using time-resolved X-ray imaging", *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12 (2020) 34254.
- [9] N.D. Parab, J.E. Barnes, C. Zhao, R.W. Cunningham, K. Fezzaa, A.D. Rollett and T. Sun, "Real time observation of binder jetting printing process using high-speed X-ray imaging", *Sci. Rep.* 9 (2019) 2499.
- [10] M. Kwon, J.-H. Choi, J.-H. Kim, J.-H. Choi, U.-S. Kim, K.-T. Hwang, Y.-M. Kang and K.-S. Han, "Optimization of inorganic powder properties for manufacturing ceramic filter using binder jetting process", *Addit. Manuf.* 70 (2023) 103564.
- [11] 3D Systems, Inc., "ProJet 360 Professional 3D Printer User Guide", (3D Systems, Rock Hill, SC, USA, 2014).
- [12] H. Miyajima, S. Zhang and L. Yang, "A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process", *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 124 (2018) 1.
- [13] M. Mariani, R. Beltrami, P. Brusa, C. Galassi, R. Ardito and N. Lecis, "3D printing of fine alumina powders by binder jetting", *J. Eur. Ceram. Soc.* 41 (2021) 5307.
- [14] M. Xia, B. Nematollahi and J. Sanjayan, "Influence of binder saturation level on compressive strength and dimensional accuracy of powder-based 3D printed geopolymer", *Mater. Sci. Forum* 939 (2018) 177.
- [15] J.-H. Choi, K.-S. Han, J.-H. Kim, S.J. Yoo, D.-S. Jung and U.-S. Kim, "Glass frit-ink development and relevant process technology for fabricating functionally graded material-structured ceramic filters via binder-jetting 3D printer", *J. Korean Ceram. Soc.* 61 (2024) 828.
- [16] E.W. Washburn, "The dynamics of capillary flow", *Phys. Rev.* 17 (1921) 273.
- [17] M. Lehmann, H. Panzer, C.G. Kolb and M.F. Zaeh, "Influence of the pore radius on the penetration depth of inks in binder jetting—a modification of the Washburn equation", *J. Manuf. Mater. Process.* 6 (2022) 101.
- [18] T. Colton and N.B. Crane, "Influence of droplet velocity, spacing, and inter-arrival time on line formation and saturation in binder jet additive manufacturing", *Addit. Manuf.* 37 (2021) 101711.
- [19] K.M. Rahman, A. Wei, H. Miyajima and C.B. Williams, "Impact of binder on part densification: Enhancing binder jetting part properties through the fabrication of shelled geometries", *Addit. Manuf.* 62 (2023) 103377.