

알루미나(Al_2O_3)를 활용한 3D 노즐 프린팅 기술 연구

안태규¹, 한규성², 김지훈^{1*}

¹공주대학교 신소재공학과, ²한국세라믹기술원 이천분원

Investigation of alumina(Al_2O_3) 3D nozzle printing process

Tae-Kyu An¹, Kyu-Sung Han², Ji-Hoon Kim^{1*}

¹Division of Advanced Materials Engineering, Kongju National University

²Icheon Branch, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology

요약 최근 3D 프린팅 산업은 다양한 형상의 세라믹 부품을 간소화된 공정으로 제조 가능하여 많은 기대를 받고 있다. 본 연구에서는 세라믹 3D 프린팅을 통하여 알루미나(Alumina) 제품을 구현하기 위하여 3D 프린팅용 점탄성 페이스트(Paste)를 제조하였다. 점탄성 특성은 세라믹 3D 프린팅 공정에서 아주 중요한 역할을 한다. 노즐을 통한 세라믹 페이스트의 압출 시에는 흐름 특성을 가져야 하며, 인쇄되어 정확한 자리에 인쇄되어 안착한 후에는 고체처럼 작동하여 형상을 유지하여야 한다. 이러한 점탄성 특성을 부여하기 위하여 페이스트를 제조할 때 엘라스토머(Elastomer) 등의 첨가물을 첨가하였고, 이렇게 제조된 페이스트의 유변학적 특성을 분석한 결과 점탄성 특성을 보이는 것을 확인하였다. 하지만, 엘라스토머의 함량에 따라 점탄성 특성이 다름을 확인하여, 점탄성 특성의 각 지표가 실질적인 인쇄성에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 다양한 형태로 인쇄성 평가를 진행하였다. 인쇄성 평가 결과 높은 항복 응력을 가지는 페이스트가 인쇄성이 우수함을 확인하였다. 이렇게 개발된 알루미나 인쇄물의 심미성을 증가시키기 위하여 고온에서 소결시에도 안정적으로 발색효과가 있는 세라믹 안료를 제조된 페이스트에 혼합하여 1300 °C에서 고온 소결을 진행하고, 소결 후 발색 효과를 확인하였다.

Abstract 3D printing technology has attracted considerable attention because of its potential to fabricate the intricate design of ceramic products. In this study, ceramic 3D nozzle printing was introduced to manufacture complex alumina products with a ceramic pigment. The alumina paste was formulated by incorporating an elastomer to impart viscoelastic properties. Viscoelastic pastes play an essential role in ceramic 3D nozzle printing. The effects of the viscoelastic properties of the ceramic pastes on their printability were assessed using comprehensive rheological analysis, and various shapes were printed. As a result, the paste with a high yield stress showed better printability. In addition, a ceramic pigment was added to the developed pastes to increase the aesthetics of the printed ceramic structure. The printed ceramic parts were sintered in air at 1300 oC. The stability of the ceramic pigment was confirmed even after high-temperature sintering.

Keywords : 3D Printing, Additive Manufacturing, Extrusion Based 3D Printing, Alumina, Ceramic Pigment

1. 서론

세라믹 인쇄 기술은 현재까지 세라믹 잉크젯 프린팅 공정을 중심으로 기판 위에 디지털 이미지를 이용하여

디지털 4원색인 Cyan, Magenta, Yellow, Black(CMYK)을 활용하여 다양한 색상의 2차원 형상을 인쇄하는 정도로 상업적으로 이용되고 있으나, 세라믹 인쇄공정이 발전함에 따라서 2차원의 형태를 넘어 3차원의

본 논문은 산업통상자원부에서 지원하는 “신가치도자산업기반구축 (BUS010025000)” 사업으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ji-Hoon Kim(Kongju National Univ.)

email: Jihoon.kim@kongju.ac.kr

Received September 25, 2019

Revised October 25, 2019

Accepted December 6, 2019

Published December 31, 2019

형태까지 다양한 색상으로 인쇄 가능한 세라믹 3D 프린팅의 공정 개발의 필요성이 점점 높아지고 있다[1]. 세라믹 3D 프린팅 공정은 일반적으로 다양한 방식이 있지만, 기본적인 원리는 원하는 형상에 맞춰 오브젝트(Object)를 레이어(Layer)의 형태로 나눈 뒤 디지털 신호를 통하여 레이어를 인쇄하고, 각 레이어를 적층하는 방식으로 3D 형상을 제조하게 된다. 이때 사용되는 원료의 경화 방식, 적층 방식에 따라서 공정을 구분하게 된다. 세라믹 3D 프린팅에 사용되고 있는 공정으로는 PP(Photo Polymerization), ME(Material Extrusion), BJ(Binder Jetting), SL(Sheet Lamination) 등의 공정이 있다[2, 3]. 다양한 공정 중 특히 ME 방식은 원료 소재(페이스트, 슬러리, 필라멘트 등)를 압력을 이용하여 연속적으로 압출하여 원하는 위치에 도포하여 3차원 구조물을 형성하는 방식이다. 그 중 3D direct nozzle printing(3DNP)는 원료를 페이스트 형태로 제조하여 압출하는 방식으로 장치 구성이 단순하여 경제성이 우수하고, 원료 소재에 높은 세라믹 함량을 가지고 있어서 탈지 및 소결 과정에서 균열 등이 발생하지 않아서 다른 방식에 비해 유리하며, 소재의 제약이 다른 방식에 비해 적어 다양한 소재 및 색상 안료 등의 첨가물을 사용하기 용이하다[4-6].

3DNP 공정을 통해서 제품을 구현하기 위해서는 페이스트에 점탄성 특성을 부여하여야 한다. 점탄성 특성은 인쇄 전반에 걸쳐서 많은 영향을 미치게 되는데, 3DNP 공정에서 필요한 점탄성 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다. (i)페이스트의 점탄성 특성을 균일하게 만들기 위하여 세라믹 필러(Filler)의 분산성이 우수하여야 하고, (ii)노즐을 통해 페이스트 압출 시에는 흐름성 즉, 전단 박화 현상(shear thinning)이 충분히 일어나 기기의 한계 압력 내에서 노즐을 통한 압출이 용이하여야 하며, (iii)인쇄 직후에는 전단 박화 현상에 의해 변화한 점도가 초기 점도에 가깝게 회복되어 인쇄된 위치에 정확히 안착한 후 고정되어야 한다. 그리고 (iv)인쇄 후 회복된 페이스트의 항복 응력이 충분하여 인쇄된 형태를 잘 유지할 수 있어 변형/파괴가 일어나지 않아야 한다. 페이스트 내의 점탄성 특성은 페이스트 내의 세라믹 함량, 첨가물(분산제, 계면활성제, 안료 등) 등에 따라 조절할 수 있으며 유변학적 특성 분석을 통하여 최적화되어 있는 페이스트 조성을 확보하는 것이 중요하다[7].

본 연구에서는 알루미늄 분말을 사용하여 점탄성 특성을 가지는 페이스트를 제조하였고, 제조된 페이스트의 특성 분석을 통하여 3차원 형상의 인쇄물 제조 가능성을 평가하였다. 또한, 첨가물로 고온 발색 세라믹 안료를 첨

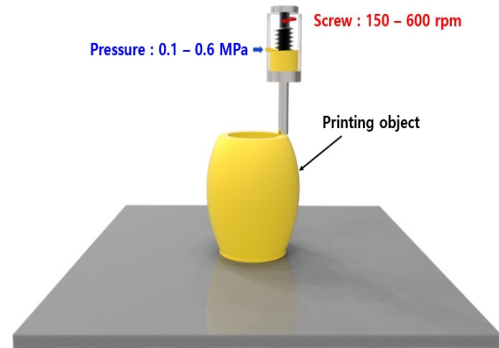


Fig. 1. Schematic of Printing process

가하여 페이스트를 제조하고, 인쇄하여 세라믹 안료의 적용가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 3D 프린팅용 페이스트 제조

Stock solution은 SIS(polystyrene-block-polyisoprene-block-polystyrene block-copolymer)(22 wt.% polystyrene/Sigma Aldrich)를 NMP(N-methyl-2-pyrrolidone)에 1:2.5의 무게비로 혼합하였다. 공자전 원심 교반 탈포기(ARE-310/Think)를 사용하여 2000 rpm, 2min으로 혼합하고, 2200 rpm, 2min으로 탈포의 조건으로 5회 반복하여 혼합 및 탈포를 진행하였다. 제조된 stock solution은 SIS의 부피비가 3.6,9 vol.%가 되도록 NMP를 추가로 첨가하여 희석시켰다. 그 후 알루미늄 분말(D₅₀:300 nm/AES-11/Sumitomo)을 57 vol.%의 비율로 Stock solution에 넣어 공자전 원심 교반 탈포기를 사용하여 2000 rpm, 2min으로 혼합하고, 2200 rpm, 2min으로 탈포의 조건으로 5회 반복하여 혼합 및 탈포를 진행하였다.

2.2 3D 프린팅 인쇄 공정

인쇄에 사용된 장비는 Fused deposition modeling(FDM) 방식의 3D 프린터(Prusa I3)에 노즐부를 스크류 디스펜서(MD-3/ Mushashi)로 교체하고 별도의 컨트롤러 박스를 제작하여 3D 프린터와 스크류 디스펜서를 연동하였고, G-code를 통하여 제어하였다. 각 디자인의 G-code는 CAD기반의 소프트웨어를 통하여 모델을 제작한 후 slicing tool(Cura)를 사용하여 작성

하였다. 제조된 페이스트는 전용 실린더에 담아 스크류 디스펜서에 적재하였고, 인쇄 압력은 각 페이스트의 조성에 따라 0.1-0.6 MPa, 스크류의 회전속도는 150-600 rpm의 조건으로 조절하여 노즐을 통한 압출속도를 10 mm/s로 동일하게 하였다. 사용된 노즐은 스테인레스 재질의 노즐로 19G(내경: 0.72mm, 외경: 1.08mm)의 노즐을 사용하였다. Fig. 1에서 3DNP 공정을 통한 3D 세라믹 구조체 형성 과정 및 장치의 구성을 묘사하였다.

2.3 3D 프린팅용 페이스트 분석

제조된 3D 프린팅용 페이스트는 rheometer (MCR-92/Anton-parr)에 직경 25 mm의 평행 플레이트(Parallel plate/PP25)를 장착하여 측정하였다. 점도 및 흐름성에 대한 거동 분석을 위하여 회전 테스트를 진행하였으며 전단율을 0.1 - 100 s⁻¹의 조건으로 분석을 진행하였고, 점탄성 거동을 분석하기 위하여 진폭 스위프 (sweep) 모드를 사용하여, 변형률은 0.01-100 %의 조건으로 평가를 진행하였다.

3. 결과

3.1 3D 프린팅용 페이스트의 유변학적 특성

3DNP 공정을 이용하여 세라믹 3D 프린팅을 하기 위한 페이스트의 특성을 유변학적 특성 분석을 통하여 확인하였다. 3DNP 공정에서 페이스트의 유변학적 특성은 매우 중요한 부분이다. 그 중 페이스트는 점탄성 특성을 가지는 것이 중요하다. 점탄성 특성이란 점성체의 특성과 탄성체의 특성을 모두 가지는 것을 말하며, 이러한 특성은 3D 프린팅에서 페이스트를 노즐을 통해 압출 시 점성체의 특성을 가져 압출할 수 있게 하며, 인쇄 후에는 탄성체의 특성을 가져 인쇄물의 형태를 유지하게 한다. 점탄성 특성은 Eq. (1)과 같이 Herschel-Bulkely model을 통하여 묘사할 수 있다[8].

$$\sigma = \sigma_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Where, σ denotes shear stress, σ_0 denotes yield stress K denotes consistency index, $\dot{\gamma}$ denotes shear rate, n denotes flow index

점탄성 특성을 부여하기 위해서는 고분자량의 엘라스

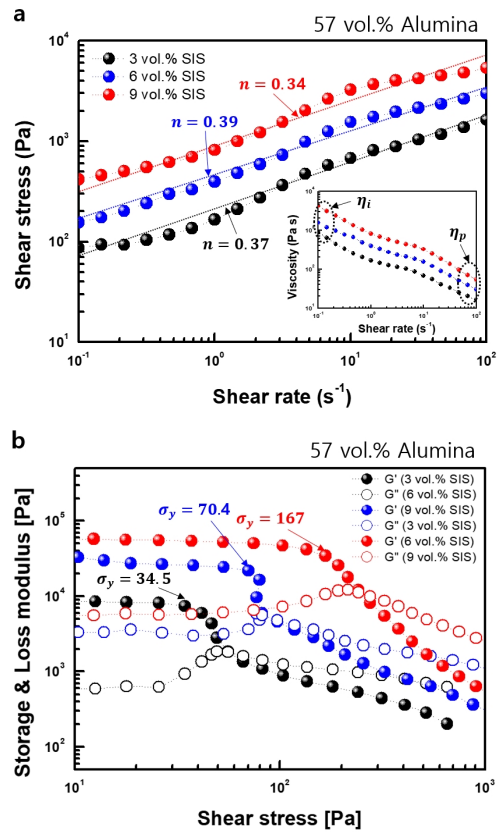


Fig. 2. Viscoelastic properties of alumina paste having various SIS concentration. (a)evolution of viscosity and shear stress (b)complex shear modulus

토머를 사용해야 한다. 그중 SIS는 다른 연구 문헌에 따르면 350,000에 달하는 분자량을 가지고 있어서 3D 프린팅에 사용되는 페이스트에 충분한 점탄성 특성을 부여할 수 있다고 학계에 보고된 바 있다[9]. 따라서 본 연구에서는 높은 세라믹 함량을 유지하기 위하여 세라믹 함량을 고정하고, 페이스트의 용매와 엘라스토머의 조성을 조절하며 점탄성 특성을 변화시켰다.

Fig. 2(a)에서 나타낸 바와 같이, 노즐을 통해 압출될 때의 흐름성을 분석하기 위하여 엘라스토머의 함량에 따른 점도의 변화를 확인하였다. 엘라스토머의 함량이 증가함에 따라서 초기 점도 값은 증가하였다. 하지만 전단율이 증가함에 따라 점도가 감소하는 전단 박화 현상이 일어나서 전단율에 따라 점도가 변화하므로 실제 인쇄공정에서의 점도를 확인하기 위하여 Eq. (2)를 사용하여 확인하였다[10].

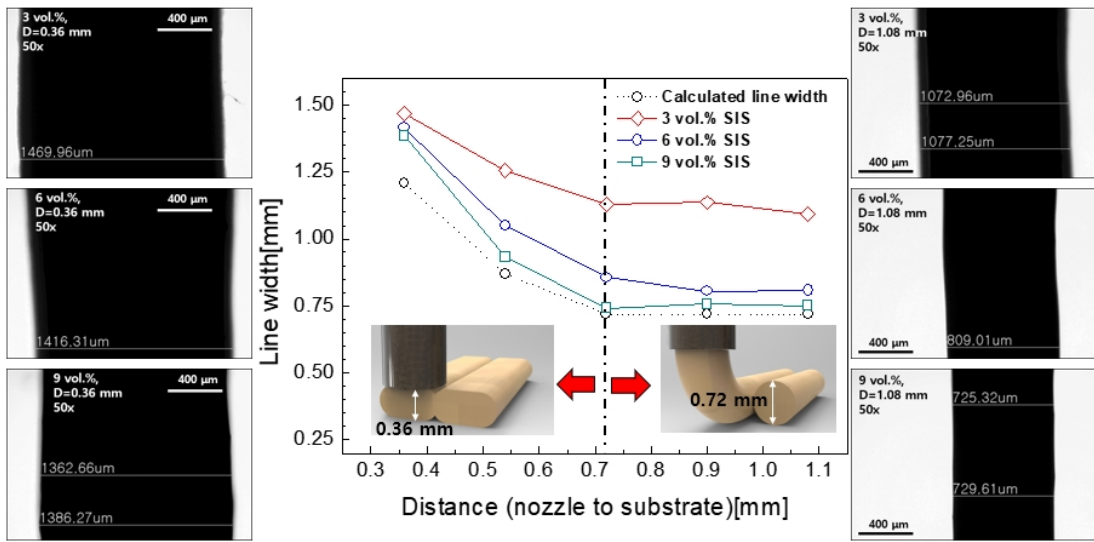


Fig. 3. Estimation of printed line width and experimentally determined line width

$$\dot{\gamma} = \frac{4P}{r} \quad (2)$$

Where, P denotes Printing speed, r denotes nozzle radius

본 연구에서 사용된 조건에서 $r=0.72$ mm, $P=10$ mm/s이고 이에 따른 Eq. (2)를 통해 전단율을 계산한 결과 111.11 s^{-1} 이다. 이에 따라 실제 인쇄 시 전단율에 따른 점도는 $10^1 - 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 크게 감소함을 확인하였다.

3DNP 공정에서 사용되는 페이스트는 흐름성을 유지하는 것도 중요하지만, 인쇄 후 형상을 유지할 수 있는 탄성 특성도 중요하다. 이에 따라 진폭 스위프 모드를 통하여 항복 응력 및 탄성 계수를 측정된 결과를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 항복 응력은 저장 탄성계수가 감소하기 시작하는 시점이고 저장 탄성계수가 손실 탄성계수보다 작아지는 시점부터 페이스트는 흐름성을 가지게 된다[11]. 본 연구에서 제조된 페이스트의 경우 엘라스토머의 함량이 증가함에 따라 탄성계수 및 항복 응력이 증가하였다. 이에 따라서 높은 엘라스토머의 함량을 갖는 페이스트가 낮은 함량 대비 형상을 잘 유지할 것으로 기대된다.

3.2 3D 프린팅용 페이스트의 인쇄성

3DNP 공정에서 3D 형상을 형성하기 위하여 선을 인쇄하고 선을 중첩하여 면을 형성한다. 이렇게 형성된 면을 중첩하여 적층하여 3D 형상을 인쇄하게 된다. 따라서 균일한 인쇄 배선을 통해 면을 형성해야 좋은 해상도의

3D 형상을 인쇄할 수 있다. 본 공정에서 일정한 속도로 인쇄를 할 경우 노즐과 기판 간격 또는 인쇄 적층면간 간격에 따라 배선의 형태 및 선폭을 예측할 수 있다. Fig. 3을 통해서 노즐과 기판 간격에 따른 인쇄 배선의 형태를 예상해서 나타냈다. 노즐과 기판의 간격이 노즐 내경보다 큰 경우에는 인쇄 노즐의 내경 면적과 동일한 단면적을 가지는 원통형의 인쇄 배선을 형성하게 되고, 노즐과 기판의 간격이 노즐 내경보다 작을 경우 인쇄 배선 노즐에 의해 눌린 형태로 변경되어 인쇄 배선이 형성되게 된다. 이때 가지는 선폭을 계산하기 위하여 식을 유도하여 선폭을 계산하였다[12].

$$V = P\pi r^2 \quad (3)$$

Where, V denotes volumetric speed

Eq. (3)에서와 같이 일정한 속도로 인쇄할 경우 항상 같은 체적속도를 가지게 된다. 따라서 인쇄된 선은 항상 같은 단면적을 가지게 된다. 이때 인쇄 배선의 형태는 각 라인의 끝부분은 반원 형태를 형성하고 가운데는 평평하게 형성이 된다. 그리고 반원의 지름은 노즐과 기판 간격과 동일하다고 가정하고 Eq. (4)에 식으로 묘사하였다.

$$A = \frac{V}{P} = \pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (l \times D) \quad (4)$$

Where, A denotes cross section of printed line, D denotes distance of nozzle to substrate, l denotes

flat length of flat region

$$L = l + D \quad (5)$$

Where, L denotes line width of printed Line

최종적으로, 위의 식을 통해 모든 값을 계산하고 나면 Eq. (5)를 통해서 인쇄 배선의 선폭을 계산할 수 있다. 위의 식을 통해 계산된 인쇄 선폭과 각 페이스트 별 인쇄 결과를 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 인쇄 배선의 형상을 유지하기 위해서는 표면장력에 의해 가해지는 압력보다 높은 항복 응력을 가져야 한다. 인쇄 배선에 가해지는 표면장력은 Young-Laplace equation으로 계산할 수 있고, Eq. (6)에 나타내었다.

$$\sigma_{st} = \gamma_{st} D^{-1} \quad (6)$$

Where, σ_{st} denotes pressure from surface tension, γ_{st} denotes surface tension

Eq. (6)을 통해 계산된 표면장력에 의한 인쇄된 표면에 가해지는 압력은 56.67 Pa이다. 예측된 인쇄 배선의 형태를 형성하기 위해서는 이 이상의 항복 응력이 필요로 하게 된다. 하지만, 3-6 vol.% SIS의 페이스트의 경우 낮거나 유사하여 라인의 형상을 유지하지 못하고 퍼짐이 발생하였지만, 표면에 가해지는 압력보다 높은 항복 응력을 가지는 9 vol.% SIS의 경우 퍼짐 없이 예측된 선폭과 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

3D 형상을 구현하기 위해 인쇄 배선을 적층할 때 가해지는 중력을 견디기 위해서도 항복 응력은 중요하다. 따라서 항복 응력이 적층에 미치는 영향을 확인하기 위하여 같은 형상을 적층하여 최대 인쇄 가능 높이를 확인하였다. 같은 선폭을 갖는 조건으로 실험하기 위해 적층 레이어의 높이는 0.36 mm의 조건으로 실험을 진행하였다. 이때에도 높은 항복 응력을 갖는 9 vol.% SIS의 페이스트가 가장 높은 높이까지 적층이 가능하였고, 그 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다.

또한, 3D 프린팅의 경우 다양하고 복잡한 형상을 제조하기 위해 서포터를 형성하는 경우가 있다. 이때 재료를 절약하기 위하여 속을 비워 인쇄를 진행한다. 이에 따라 최대 span 길이를 확인하는 것이 중요하여 각 페이스트 조성별 span 길이를 확인하였고, 그 결과를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

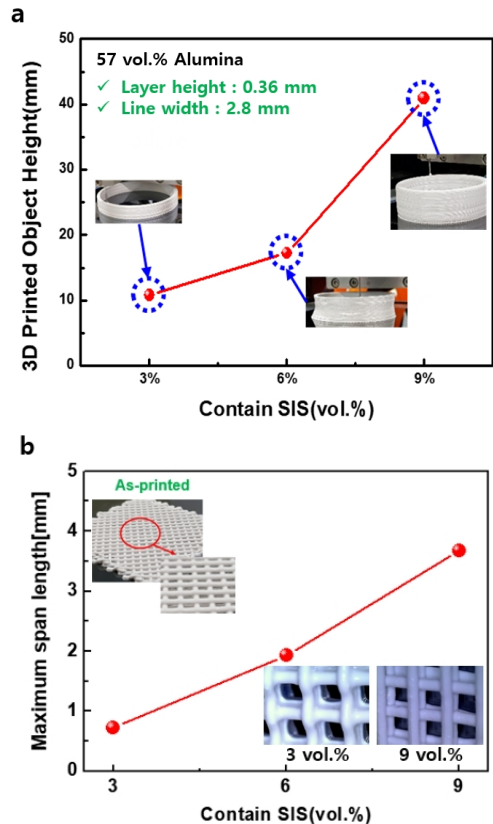


Fig. 4. Printability of Alumina paste having various SIS concentration. (a)Experimentally determined maximum height (b)Experimentally determined maximum span length

3.3 세라믹 안료를 활용한 세라믹 3D 프린팅

세라믹 3D 인쇄물의 심미성을 증대시키기 위해서 고온 발색 세라믹 안료를 본 공정에서 제조한 페이스트에 적용하였다. 일반적으로 인쇄공정에서 다양한 색상을 표현하기 위해서 cyan, magenta, yellow의 색상의 안료를 요구되는 색상의 맞춰서 혼합하여 사용한다. 따라서 본 연구에서는 알루미나 분말에 10%씩 각 색상의 고온 발색 세라믹 안료를 혼합하여 페이스트를 제조하였고, 인쇄를 진행하여 인쇄물을 인쇄하였다. 제조된 인쇄물의 소결은 1300 °C에서 5시간 유지하였고, 25 °C/hr의 승온 조건을 사용하여 소결 시 균열 및 뒤틀림이 없는 세라믹 구조물을 3D 프린팅 공정을 통하여 제조하였다. 제작된 세라믹 구조물들은 소결 후에도 발색효과가 있었으며, Fig. 5에 각 색상의 세라믹 안료를 혼합한 페이스트를 인쇄 구조물을 나타내었다[13-15].



Fig. 5. Various ceramic 3D printing structures with ceramic pigment. (a) Schematic of high temperature ceramic pigment (b) 3D printed alumina structure (c) and (d) 3D printed structure with magenta pigment (e) and (f) 3D printed structure with yellow pigment (g) application of 3D printed Lamp structure with LEDs (h) 3D printed structure with cyan pigment

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄 소재를 활용해서 3DNP 공정을 통해 세라믹 제품을 제조하기 위하여 3DNP 공정에 적합한 페이스트를 제조하였고, 페이스트의 점탄성 거동 및 특성을 분석한 후 실제 인쇄에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 점탄성 거동에 의한 인쇄성의 변화를 확인하기 위하여 엘라스토머인 SIS의 첨가량을 변화시키며 점탄성 특성의 변화를 주었다. SIS의 첨가량이 증가함에 따라 점도, 탄성계수, 항복 응력이 증가함을 확인하였다. 점탄성 특성의 변화는 인쇄성에도 많은 영향을 미쳤다. 변화시킨 구성에 의해서 점성 특성은 변화하였지만, 모든 조성의 페이스트가 본 연구에 사용된 장비의 한계 압력 내에서 압출이 가능하였다. 하지만 각 조건에 따라 항복 응력이 달라짐에 따라서 인쇄 배선의 형태 및 선포, 최대 인쇄 가능 높이, span 가능 길이의 변화 등이 나타났고, 높은 항복 응력을 갖는 페이스트가 인쇄성이 더 우수함을 확인하였다. 개발된 공정에서 3D 구조물의 심미성을 증대시키기 위하여 고온 발색 세라믹 안료를 개발된 페이스트와 혼합하였고, 1300 °C에 온도에서 소결을 진행하였음에도 발색효과가 충분히 있음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 개발된 공정을 통해 심미성이 충분한 세라믹 3D 구조물을 인쇄할 수 있음을 확인하였고, 추후 산업적으로 많은 효과가 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. W. Kwon, J. H. Lee, K. T. Hwang, J. H. Kim, K. S. Han, "Rheological behavior and ink-jet printing characteristics of aqueous ceramic complex ink." *J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol.* Vol.28, No.3, pp.123-129, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2018.28.3.123>
- [2] K.V. Wong, A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing." *ISRN Mechanical Engineering*, Vol.2012, pp.1-10, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- [3] Z. Chen, Z. Li, J. Li, C. Liu, C. Lao, Y. Fu, C. Liu, Y. Li, P. Wang, Y. He, "3D printing of ceramics: A review." *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.39, No.4, pp.661-687, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013>
- [4] X. Lu, Y. Lee, S. Yang, Y. Hao, J. R.G. Evans, C. G. Parini, "Solvent-based paste extrusion solid freeforming." *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.30, No.1, pp.1-10, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.07.019>
- [5] E. Feilden, E. G. Blanca, F. Giuliani, E. Saiz, L. Vandeperre, "Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks." *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.36, No.10, 2525-2533, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.03.001>
- [6] J. Cesarano, "A review of robocasting technology." *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, MRS, Vol.542, pp.133-139, 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-542-133>
- [7] J. E. Smay, G. M. Gratson, R. F. Shepherd, J. Cesarano III, J. A. Lewis, "Directed Colloid assembly of 3D

periodic structures." *Advanced Materials*, Vol.14, No 18, pp.1279-1283, 2002.

DOI:

[http://dx.doi.org/10.1002/1521-4095\(20020916\)14:18%3C1279::AID-ADMA1279%3E3.0.CO;2-A](http://dx.doi.org/10.1002/1521-4095(20020916)14:18%3C1279::AID-ADMA1279%3E3.0.CO;2-A)

- [8] W. H. Herschel, R. Bulkley, "Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollosungen.", *Kolloid Zeitschrift* Vol.39, No.4, pp.291-300, 1926.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01432034>
- [9] Y. Jo, J. Y. Kim, S. Y. Kim, Y. H. Seo, K. S. Jang, S. Y. Lee, S. Jung, B. H. Ryu, H. S. Kim, J. U. Park, Y. Choi, S. Jung, "3D-printable, highly conductive hybrid composites employing chemically-reinforced, complex dimensional fillers and thermoplastic triblock copolymers." *Nanoscale*, Vol.9, No.16, pp.5072-5084, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1039/c6nr09610g>
- [10] A. M'Barki, L. Bocquet, A. Stevenson, "Linking Rheology and Printability for Dense and Strong Ceramics by Direct Ink Writing." *Scientific Reports*, Vol.7, No.6017, pp.1-10, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06115-0>
- [11] J. A. Lewis, "Colloidal processing of ceramics.", *J. Am. Ceram. Soc.* Vol.83, No.10, pp.2341-2359, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01560.x>
- [12] W. Li, A. Ghazanfari, M. C. Leu, R. G. Landers, "Extrusion-on-demand methods for high solids loading ceramic paste in freeform extrusion fabrication." *Virtual and Physical Prototyping*, Vol.12, No.3, 193-205, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1312735>
- [13] Z. Pan, Y. Wang, H. Huang, Z. Ling, Y. Dai, S. Ke, "Recent development on preparation of ceramic inks in ink-jet printing." *Ceramics International*, Vol.41, No.10 pp.12515-12528, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.06.124>
- [14] M. Dondi, M. Blosi, D. Gardini, C. Zanelli, "Ceramic pigments for digital decoration inks: An overview.", *Ceramic Forum International*, Vol.89, No.8-9, pp.1-12, 2012.
- [15] P. M. T. Cavalcante, M. Dondi, G. Guarini, M. Raimondo, G. Baldi, "Colour performance of ceramic nano-pigments." *Dyes and Pigments*, Vol.80, No.2, pp.226-232, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2008.07.004>

안 태 규(Tae-Kyu An)

[정회원]



- 2019년 2월 : 공주대학교 신소재 공학과 (공학석사)
- 2019년 2월 ~ 현재 : 공주대학교 신소재공학과 (박사과정)

<관심분야>

3D 프린팅, 산화물 전자소자

한 규 성(Kyu-Sung Han)

[정회원]



- 2005년 2월 : 한국과학기술원 신소재공학과 (공학석사)
- 2009년 8월 : 한국과학기술원 신소재공학과 (공학박사)
- 2012년 5월 : 코넬대학교 박사후 연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국세라믹기술원 이천분원 (책임연구원)

<관심분야>

세라믹, 나노입자, 잉크소재

김 지 훈(Ji-Hoon Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 광주과학기술원 신소재공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 애리조나주립대학교 신소재공학과 (공학박사)
- 2009년 1월 ~ 2012년 2월 : 한국세라믹기술원 책임연구원
- 2012년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

인쇄전자, 산화물 전자소자