

ARTICLE

3D 프린팅 기술: 푸드테크 분석

김유리[#] · 윤현정[#] · 김범근 · 최희돈 · 최윤상^{*}

한국식품연구원 가공공정연구단

3D Printing Technology : Food Tech Analysis

Yuri Kim[#], Hyun-Jung Yun[#], Bum-Keun Kim,
Hee-Don Choi, Yun-Sang Choi^{*}

Research Group of Food Processing, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Korea

Received: May 08, 2022
Revised: June 02, 2022
Accepted: June 03, 2022

These authors contributed equally to this work

*Corresponding author :
Yun-Sang Choi
Research Group of Food Processing,
Korea Food Research Institute,
Wanju 55365, Korea
Tel : +82-63-219-9387
E-mail :kcys0517@kfri.re.kr

Copyright © 2022 Resources Science Research Institute, Kongju National University. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Yuri Kim
<https://orcid.org/0000-0002-8482-1644>
Hyun-Jung Yun
<https://orcid.org/0000-0001-6217-1938>
Bum-Keun Kim
<https://orcid.org/0000-0002-9752-741X>
Hee-Don Choi
<https://orcid.org/0000-0001-8973-0330>
Yun-Sang Choi
<https://orcid.org/0000-0001-8060-6237>

Abstract

This study was conducted to contribute to the vitalization of the food industry through future food tech analysis of 3D printing technology. Interest in the future food industry of sustainability is increasing in the 4th industrial revolution, and the global food market trend is developing food tech that combines innovative technologies. Research to converge with the 3D printing field and converge to various food tech fields is in progress, and it is intended to be used as a growth engine to seek the development of the food industry. Materials applicable to 3D printing were investigated. Among them, 3D printing technology applicable to grains, proteins and starches, dairy products and sugar materials was investigated. 3D printing technology that can be applied to food can be classified into fused deposition modeling (FDM), color jet printing (CJP), selective laser sintering (SLS) & hot air sintering, and binder jetting. Also, the type of food material and nozzle used is different depending on the 3D printing technology. The results of this study provided information on the development of 3D printing technology and materials, and research trends are examined from the food tech perspective for the application of 3D printing technology as a future food industry. Thus, innovative development for the sustainable future food industry will proceed with food tech fused with 3D printing technology in the era of the 4th industrial revolution.

Keywords

Food tech, 3D printing, Future food industry, Industrial revolution, Nozzle

1. 서론

4차 산업혁명 시대에 지속가능성의 미래 먹거리 산업에 대한 관심이 증대되고 있으며, 세계 식품시장 트렌드는 혁신적인 기술이 융합된 푸드테크 (food tech) 기술 개발이 활발히 진행되고 있다 (Broad, 2019; Yong *et al.*, 2021). 선진국에서는 ICT 융복합 기술을 적용한 푸드테크와 바이오기술 등의 개발이 진행되고 있으며, 빅데이터의 활용 및 블록체인 기술 접목 등을 통해 식품과 4차 산업혁명 기술의 접목을 위해 노력하고 있다 (Gwon, 2021). 특히 3D 프린팅 분야와 접목하여 다양한 푸드테크 분야에 융합하려는 연구들이 진행 중에 있으며, 식품산업의 발전을 모색하기 위한 성장동력으로 활용하고자 한다 (Park *et al.*, 2019).

최초의 3D 프린팅 기술은 1983년 미국의 Charles W. Hull에 의하여 발명되었으며, 이는 컴퓨터 모델 프로그램을 활용하여 고분자 원료를 한 층씩 쌓는 적층을 통해 입체적 구조물 제작으로 시작되었다 (Kim *et al.*, 2020). 3D 프린팅의 기본원리는 고분자 물질 소재를 설계도에 맞춰서 적층 제조법 (additive manufacturing)으로 제품을 형상화하는 것을 말하며, 원재료의 소모가 적으며 공급라인이 짧아짐에 따라 에너지를 절감할 수 있다 (Yang and Lee, 2022). 초기에는 제품 생산이 신속하여 자동

차 설계, 의료 등의 고가의 장비 시제품 제작에서 주로 이용되었으나 (Cho et al., 2021), 기술의 진보로 디자인, 교육, 건축, 바이오 분야 등 다양한 분야에 활용이 가능하였다 (Song and Min, 2021). 이러한 3D 프린팅은 현재 과학기술계에서 가장 주목받고 있는 기술로서, 기존 대량 생산에 적합한 성형, 가공 방식보다 정교하고 자동화 방식으로 편리하게 제품을 제작할 수 있다 (Jang and Chung, 2021).

식품 분야에서는 미국 코넬대학교 호드립슨 교수가 2006년도에 3D 식품 프린팅을 최초로 선보였으며, 초기에는 초콜릿, 쿠키 및 치즈를 원료로 조형물을 출력하는 수준이었다 (Kim, 2018). 식품 3D 프린터 원리는 CAD (computer aided design/draft)나 3D 스캐너를 통하여 만들어진 3차원 디지털 디자인을 식품구성 비율을 반영하여 식품원료를 적층하여 3차원으로 구성하는 식품제조 기술이다 (Lee et al., 2021b). 식품 3D 프린터의 적층형식에 따라 압출방식 (material extrusion)과 파우더베드방식 (powder bed fusion)으로 구분하기도 한다. 식품 3D 프린터의 대표적인 기술로는 FDM (fused deposition modeling), SLS (selective laser sintering), CJP (color jet printing) 등이 있으며, FDM은 고온과 고압으로 원료를 작은 구멍으로 밀어내서 한 층씩 적층하는 방식으로 초콜릿이나 반죽처럼 점성이 있는 식재료를 출력하는 압출방식이다 (Kim et al., 2020). SLS는 분말 형태의 원료를 얇게 적층하고 레이저를 분사하여 굳혀가면서 적층시키는 방식으로, 설탕, 전분 등의 분말원료를 주로 활용한다 (Kim et al., 2020b). CJP는 식용 가능한 식품 분말이나 액체를 분사하는 방식으로 낮은 점도의 재료를 활용하여 프린터하는 기술이다 (Kim et al., 2020b).

식품 3D 프린팅 기술 상용화의 제한은 식품을 출력하기 위한 3D 프린팅의 보급, 식품소재가 출력되기 위한 기술과 소재의 개발 등이 필요한 요소기술이다 (Liu et al., 2017). 전세계적으로 3D 프린팅 기술은 미래 육성 산업의 핵심으로 다루고 있으며, 3D 프린팅 기술 보급 및 고도화에 주력하고 있다 (Rando and Ramaioli, 2021).

따라서 본 연구에서는 3D 프린팅 기술의 적용을 위한 푸드테크 관점에서 식품 3D 프린팅 기술과 소재 및 연구동향을 살펴보고, 미래 먹거리 식품산업으로서의 3D 프린팅의 발전전망에 대하여 분석하고자 하였다.

II. 3D 프린팅 적용 식품소재

곡류 기반 프린팅 소재

식품은 유동성과 인쇄성에 영향을 미치는 복잡한 구조로 구성되어 있다. 최근 3D 프린팅이 가능한 식품 소재의 범위가 크게 확대되면서 식품소재의 종류와 특성에 대한 정보는 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 곡류 기반, 단백질과 전분 기반, 초콜릿 기반, 육류 및 유제품 기반 및 설탕 기반 소재와 같은 다양한 식품 재료의 유변학적, 조직적, 구조적 특성을 조사하였다 (Table 1). 도우 (dough)는 물과 글루텐 (gluten) 단백질 사이에 상호작용으로 팽창이 발생하고 점탄성 특성을 가진다 (Hoseney and Rogers, 1990). 이러한 점탄성 특성으로 인하여 베이킹, 튀김 등의 후가공시 굳어지는 능력을 갖추고 있어 3D 프린팅 재료가 될 수 있다. Liu et al. (2019a)에서는 밀가루와 동결건조 망고 분말을 주재료로 하여 원료들의 비율이 프린팅에 미치는 영향을 조사하고 프린팅 매개변수를 분석하고 최적화하였다. Kim et al. (2019)은 하이드로콜로이드 혼입을 통해 기존 쿠키의 성분 및 특성을 유지하면서 고온의 후가공 단계에서 제품 변형을 억제하는 기술을 개발하였다. 이를 위해 메틸셀룰로오스와 잔탄검이 제품의 유변학적 특성, 인쇄 성능, 텍스처 프로파일 및 최종 품질에 미치는 영향을 조사하였다. 조사 결과, 0.5 g/100 g 잔탄검을 혼입한 쿠키 도우가 후가공시 기계적 강도 저하를 억제하여 3D 디자인 모양을 잘 유지하는 것으로 나타났다. 또한 3D 프린팅 기술을 활용하여 프로바이오틱스가 함유된 베이커리 제품도 개발되었다 (Zhang et al., 2018). 반죽 구조의 표면 대 부피 비율을 증가시킴으로써 베이킹 동안 프로바이오틱스의 생존력이 향상되었음을 검증하였다. 곡류는 필수 아미노산, 미네랄, 비타민이 풍부하여 전 세계에서 주식으로 사용되고 있기에 중요한 3D 프린팅 소재로서 관심을 받고

Table 1. Recent researches on food materials used in 3D food printing

Category	Product	Main materials	Research purpose	Printing technology	Reference
Cereal-based materials	Dough	Wheat flour, olive oil, freeze-dried mango powder	Investigation of the effect of material composition on the quality of 3D-printed food	Fused deposition modeling	Liu <i>et al.</i> (2019a)
		Wheat flour, butterfat, powdered sugar, milk	Incorporation of hydrocolloid during post-processing improves shape retention of cookie dough	Fused deposition modeling	Kim <i>et al.</i> (2019)
		Wheat flour, calcium caseinate	Presenting the feasibility of 3D printing for the development of bakery products containing probiotics	Fused deposition modeling	Zhang <i>et al.</i> (2018)
	Grain gel	Rice flour, egg	Optimization of egg printability and printing process by adding rice flour	Fused deposition modeling	Anukiruthika <i>et al.</i> (2020)
Raw black rice, job's tear seeds, mung bean, brown rice, buckwheat		Validation of the use of simulated piston pressure as a criterion for evaluating the printing performance of various grain gels	Fused deposition modeling	Guo <i>et al.</i> (2020)	
Protein and starch-based materials	Milk protein gel	Milk protein concentrate, sodium caseinate	Evaluation of printability of soft foods using milk protein	Fused deposition modeling	Liu <i>et al.</i> (2019b)
	Soybean protein isolate gel	Soybean protein isolate, xanthan gum, NaCl	Rheological and LF-NMR spectral properties study of SPI gels at various concentrations	Fused deposition modeling	Phuhongsung <i>et al.</i> (2020)
	Lemon juice gel	Lemon juice, potato starch	Investigation of 3D printing parameters of lemon juice gel as a gel product	Fused deposition modeling	Yang <i>et al.</i> (2018)
	Mashed potato	Potato flakes, UHT full cream milk, <i>Bifidobacterium</i>	Investigation of printing parameters and storage time for probiotic viability in 3D-printed mashed potatoes	Fused deposition modeling	Liu <i>et al.</i> (2020)
		Gelatinized potato flakes, gelatinized purple sweet potato	A study of the effect of pH and potato flake content on the 3D printing properties of mashed potatoes	Fused deposition modeling	He <i>et al.</i> (2020)
Starch	Wheat starch, maltodextrin, palm oil powder	Investigate the effect of changing SLS process parameters at smaller length scales	Selective laser sintering	Jonkers <i>et al.</i> (2022)	
Dairy and meat materials	Chocolate	Dark chocolate, Mg-ST, plant sterol	Investigation of the effect of additives in extrusion-based 3D printed chocolate	Fused deposition modeling	Mantihal <i>et al.</i> (2019)
	Cheese	Processed cheese	Investigation of 3D printing for food applications using commercially available processed cheese as a printing material	Fused deposition modeling	Le Tohic <i>et al.</i> , (2018)
	Meat	Chicken meat, refined wheat flour	Provides insight into the development of customized meat products fortified with dietary fiber	Fused deposition modeling	Wilson <i>et al.</i> (2020)

Table 1. Continued

Category	Product	Main materials	Research purpose	Printing technology	Reference
Dairy and meat materials	Meat	Stir-fry beef, lard	Investigation of possible changes in the layer of lard deposited within the beef paste structure	Fused deposition modeling	Dick <i>et al.</i> (2019)
		Pork leg meat, xanthan gum, guar gum	Investigation of formulation effect on printability of texture-modified pork paste according to hydrocolloid incorporation	Fused deposition modeling	Dick <i>et al.</i> (2020)
Sugar materials	Sugar	Sugar	3D structure construction by selectively fusing sugar powder by spraying adhesive	Color jet printing	3D Systems. (2014)
		Sugar powder	Providing a method for preparing food with various microstructures using a multi-material powder composition	Selective laser sintering	Diaz <i>et al.</i> (2018)
		Sugar	Creating 3D structures by selectively fusing sugar using hot air beam	Hot air sintering	CandyFab. (2006)

있다 (Singh *et al.*, 2016). Anukiruthika *et al.* (2020)에서는 인쇄 공정을 보조하는 쌀가루의 첨가가 난황과 난백의 조직 및 유변학적 특성에 유의한 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 이때 단백질이 쌀가루와 결합하여 유사가스성 거동을 갖는 페이스트를 형성함으로써 인쇄성이 향상되었다. 3D 프린팅 소재로 흑미, 울무 씨, 녹두, 현미 및 메밀 등 5가지 거친 곡물의 사용 방법을 연구하였다 (Guo *et al.*, 2020). 프린팅에 필요한 피스톤 압력을 시뮬레이션하여 녹두 젤에서 가장 높은 압력 값을 가졌으며 이 결과는 최소 유동 응력 및 프린팅 결과와 일치함을 입증하였다.

단백질과 전분 기반 프린팅 소재

단백질은 생명 유지에 필수적인 영양소로서 대부분의 생물학적 기능에 관여한다. 단백질이 풍부한 음식을 씹거나 삼키기 어려운 사람들을 위해 맞춤형 3D 프린팅 단백질 제품이 문제를 해결해 줄 수 있다. Liu *et al.* (2019b)은 농축 우유 단백질 겔을 제조하여 유변학적, 조직적 및 기계적 거동과 겔 유형 및 수분 분포를 조사하였다. 단백질 매트릭스의 총 단백질 함량 증가에 따라 3차원 구조로 변형되어 3D 프린팅에 유리하였고, 유변학적 특성이 연질 재료의 3D 프린팅 적용 가능성 평가에 활용될 수 있음을 입증하였다. Phuhongsung *et al.* (2020)는 잔탄검과 NaCl의 농도에 따른 분리 대두 단백질 겔의 3D 프린팅 가능성과 유변학적 및 LF-NMR 특성 사이의 상관관계를 분석하였다. 이러한 상관관계는 분리 대두 단백질 겔의 프린팅 성능을 결정하고 시행착오를 줄이는 능력을 결정하는 데 사용할 수 있다.

보수력, 투명성 및 노화 방지 특성이 우수한 감자 전분을 겔화제로 선택하여 레몬주스 겔 기반 3D 프린팅 식품을 개발하였다 (Yang *et al.*, 2018). 3D 프린팅 공정 최적화 결과는 소재 특성뿐만 아니라 노즐 직경, 노즐 이동 속도 및 압출 속도가 3D 프린팅 제품의 품질에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 으깨 감자의 제형을 최적화하여 프로바이오틱스를 첨가한 기능성 식품도 3D 프린팅 기술로 개발하였다 (Liu *et al.*, 2020). 이 연구를 통해서 유통기간 동안 프로바이오틱스의 생존 가능성에 대한 프린팅 매개변수의 영향을 조사하였다.

초콜릿 기반 프린팅 소재

초콜릿은 특정 온도에서 녹고 이전 레이어에 부착되면 빠르게 응고되는 특성이 있으므로 3D 프린

팅 적용에 적합하다 (Hao *et al.*, 2010; Sood *et al.*, 2010). 다크 초콜릿은 코코아 매스, 설탕, 유화제 등으로 구성되어 있으며 이러한 성분들이 다양한 열적 특성이 있으므로 초콜릿의 유동 거동에 영향을 미친다. Mantihal *et al.* (2019)에서는 다크 초콜릿에 가공 보조제로서 마그네슘 스테아레이트 분말과 식물성 스테롤 분말을 첨가하여 압출 과정에서 초콜릿의 유동성을 향상시켰다. 첨가물이 초콜릿의 열적 특성을 방해하지 않았으며 유사가소성 거동을 보였다.

육류 및 유제품 기반 프린팅 소재

육류는 본질적으로 프린팅할 수 없는 재료 중 하나이다 (Liu *et al.*, 2018). 그러므로 유동성과 점도 향상을 위한 첨가제를 추가하여 유연학적 및 기계적 특성을 조절함으로써 압출 가능한 페이스트 형태를 만들어야 한다. Wilson *et al.* (2020)은 닭고기에 가장 기반 혼합분말을 첨가해 식이섬유가 풍부한 맞춤형 육류 제품의 인쇄 가능성을 확인하였다. Dick *et al.* (2019)은 충전 밀도와 라드 함량이 후가공 (수비드 조리) 공정 후 물리적 변화와 질감에 미치는 영향을 조사하였다. 충전 밀도는 보수력, 경도 및 씹힘성과 비례하였고, 수축률과 응집력과는 반비례했으며, 라드 함량은 반대의 경향을 보였다. 이 연구는 후처리 품질 특성뿐만 아니라 미래에 맞춤형 지방 함량과 지방 분포를 가진 3D 육류 제품을 위한 아이디어를 제공할 수 있다. 또한, 연하곤란이 있는 사람들을 위한 3D 프린팅 육류기반 연구로 진행되고 있으며, 잔탄검과 구아검을 사용해 돼지고기 페이스트의 조직, 미세구조와 유연학적 특성에 대해 평가하였다 (Dick *et al.*, 2020).

가공치즈는 천연치즈, 유화 염 이외에도 색소, 향료 등 첨가제 성분으로 이루어져 있으며 이를 가열, 혼합 및 유화시켜 제조하는 것으로 알려져 있다. Le Tohic *et al.*, (2018)에서는 일반치즈, 용융된 치즈, 프린팅한 치즈의 차이점 분석을 통해 3D 프린팅의 잠재적 응용 가능성을 보여주었다. 용융시킨 치즈와 프린팅된 치즈는 일반치즈 샘플에 비해 경도가 최대 49% 감소하였고, 14%에서 21% 범위의 더 높은 용융도를 나타냈다. 따라서 3D 프린팅 공정이 최종 제품의 색상과 질감에 영향을 줄 수 있다는 결론을 내렸다.

설탕 기반 프린팅 소재

식품 3D 프린팅에서 과립 또는 파우더 설탕은 SLA, HAS 또는 binder jetting 기술에 사용될 수 있다 (Godoi *et al.*, 2016). 설탕의 분말 유동성과 습윤성은 인쇄된 제품의 해상도와 기계적 특성을 결정하기 때문에 매우 중요하다. 설탕의 물리적 특성으로 열을 주 인쇄 메커니즘으로 사용하는 SLS, HAS 기술에 적합하다. 설탕 기반으로 프린팅한 예로는 CandyFab 기계를 사용해 뜨거운 공기 빔으로 설탕을 선택적으로 융합해 구조를 만들 수 있다.

III. 식품 3D 프린팅 기술 분석

식품 3D 프린팅은 식품 원료의 구성을 자유롭게 할 수 있어 개인맞춤형 식품 제조가 용이하며, 출력되는 식품의 구조에 따라 물성 조절이 가능하다 (Yoon *et al.*, 2016). 식품에 접목할 수 있는 3D 프린팅 기술에는 fused deposition modeling (FDM), color jet printing (CJP), selective laser sintering (SLS) & hot air sintering, binder Jetting으로 분류할 수 있으며 (Fig. 1) 기술에 따라 사용되는 식품 재료와 노즐의 종류가 다르다 (Table 2). 사용하고자 하는 식품의 소재에 따라 적절한 3D 프린팅 기술을 선택하는 것은 구조물 형상에 있어 중요한 부분이며, 다음에는 각각의 식품 3D 프린팅 기술을 설명하였다.

Fused Deposition Modeling (FDM)

FDM 방식은 고온 및 고압으로 원료를 밀어내어 한 층씩 적층하는 방식으로 냉각 후 모든 층은

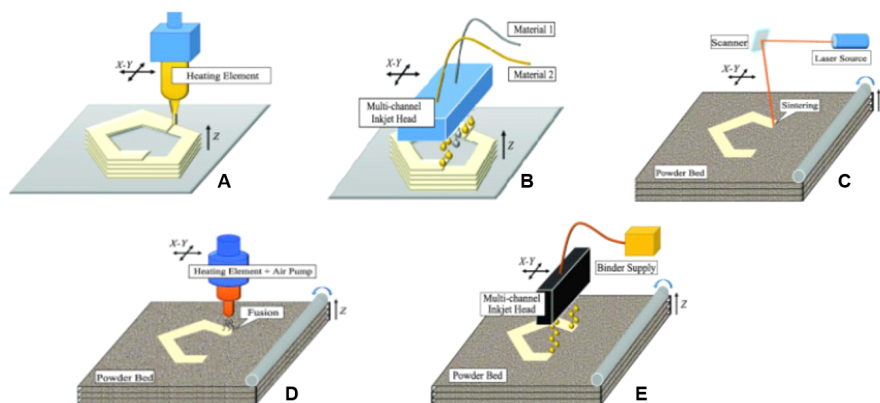


Fig. 1. Fused depositon modeling (FDM) (A), color jet printing (CJP) (B), selective laser sintering (SLS) (D), hot air sintering (E), binder jetting (F). (Sun et al., 2015).

Table 2. 3D food printing technology and food materials

Category	Principle	Food materials
Fused deposition modeling (FDM)	Food material is extruded from the nozzle and deposited at a time	Chocolate, cookie dough, cheese, potato
Color jet printing (CJP)	Drop edible binding agent on powder bed	Sugar powder, starch, low viscosity food
Selective laser sintering (SLS) & Hot air sintering	Edible powder is melted with a laser (or heat) and then sintered	Powder ingredients such as sugar and starch
Binder jetting	Deposition by dropping binder in edible powder	Sugar powder, flour, starch

이전 층과 융합된다 (Nachal et al., 2019). 압출 기반의 인쇄는 신선한 음식에 적용 가능하여 식품 재료의 선택 범위가 넓어 최근 대부분의 3D 프린터에 사용되고 있다 (Liu et al., 2019c; Mantihala et al., 2020). 초콜렛, 쿠키 반죽, 으깬 감자, 치즈, 페이스트 등 다양한 식품을 프린팅에 사용하고 있으며, 재료에 어느 정도 점성을 가지고 기계적 강도가 높다면 3D 출력이 가능하다 (Yoon et al., 2016). 그러나 이 방식은 노즐로부터 재료가 압출할 수 있으면서 동시에 다음 층의 출력물을 지지할 수 있어야 하며 (Pérez et al., 2019), 출력 도중에 지속해서 식자재를 공급하기에 어려움이 있다 (Lee, 2021a).

Color Jet Printing (CJP)

잉크젯 프린트 헤드를 이용해 분말 재료의 원료와 점착제를 실린저로부터 떨어뜨려 증착하는 방식이다. 롤러를 사용하여 트레이에 분말을 퍼뜨리고 프린트 헤드가 분말 트레이를 터치하면서 점착제를 떨어뜨려 3D 형상을 제조한다. 점착제가 떨어지지 않은 부분은 제조하고자 하는 형상을 지지하기 때문에 제조 과정 중, 지지 구조가 불필요하다 (Silva et al., 2008). 점착제에 색상을 첨가하고 여러 개의 실린저를 이용해 FDM에서는 구현하지 못하는 수만 가지의 색을 구현할 수 있다 (Kim et al., 2020). 또한 제조 과정 중의 열처리가 필요 없으며 재료의 상태변화가 크게 일어나지 않아 FDM과는 식품 재료 선택이 다르다. 설탕 및 녹말과 같이 일반적으로 낮은 점도의 재료를 사용하고 따라서 복잡한 구조를 형성하기보다는 평평한 도면을 인쇄하는 데 사용된다 (Le-Bail et al., 2020). 분말의 입자 크기와 점착제의 결정 크기가 작아짐에 따라 출력물의 해상도는 높아지며 분말이 분사되는 노즐의

입구 직경에 해상도를 의존한다 (Yoon *et al.*, 2016).

Selective Laser Sintering (SLS) & Hot Air Sintering

선택적으로 레이저나 열풍을 이용해 분말을 결합하는 3D 인쇄 방식은 원료 분말을 분말 베드에 넣은 후 설정된 형태에 따라 분말을 녹여 고체층을 형성한다. 나머지 분말 층은 그대로 남아 구조를 지지하는 역할을 하며, 이 과정은 최종적인 3D 출력물을 인쇄할 때까지 반복한다 (Awad *et al.*, 2020). 이러한 방식의 장점은 출력이 자유로우며 분말 층을 변경하기만 하면 하나의 식품 출력물의 구성을 다양하게 할 수 있는 것이다. 단점은 이와 관련된 다양한 변수로 인쇄 과정이 복잡해질 수 있다. 또한 이 방식의 식품 재료는 분말로 한정적이며 다양한 식품을 적용하는 데 한계가 있어 식품 분야에서 널리 사용되고 있지 않다 (Sun *et al.*, 2015). SLS는 분말베드를 기본적으로 가지고 분말 베드 위에 원하는 부위만 레이저로 녹여 융합한 후 굳혀가면서 적층하는 방식이다 (Dankar *et al.*, 2018). 설탕, 전분 등의 분말 원료가 사용되며, 색소나 향료와 같은 식품첨가물을 첨가하기도 한다 (Kim *et al.*, 2020a).

Hot air sintering은 SLS와 같은 원리로 분말 베드에 레이저가 아니라 열풍을 원하는 영역에 분사하여 분말을 결합하고 굳혀 3D 구조물을 제작하는 방식이다. 식품 재료로는 SLS와 마찬가지로 설탕과 같은 분말 원료가 사용된다 (Dankar *et al.*, 2018).

Binder Jetting

Binder jetting은 CJP와 유사한 원리로 분말베드를 미리 준비한 후 구현하고자 하는 3D 구조물 형상에 따라 결합제를 분말에 분사하여 구조물을 제작하는 방식이다 (Dankar *et al.*, 2018). 인쇄 공정에서 롤러는 분말을 고르게 분산화 후 실린저가 설정된 형상에 따라 분말 층에 2D 패턴을 완성한다. 2D 패턴으로 완성된 층과 지지하는 분말 층을 함께 낮추어 3D 형상이 완성될 때까지 인쇄 과정을 반복한다 (Holland *et al.*, 2018). 식품 재료로 사용되는 분말의 입자와 기공 크기가 고른 정도는 3D 출력물의 밀도와 인쇄 공정에 영향을 미치는데, 입자가 고른 분말은 얇고 표면이 균일한 분말 층을 형성하고 결합제의 침투 시간을 감소시키기 때문이다 (Mostafaei *et al.*, 2020; Miyajima *et al.*, 2020). 식품 원료로는 밀가루, 전분 등과 같은 분말로 제한되고 있다 (Pitayachaval *et al.*, 2018).

IV. 요약

4차 산업혁명 시대에 혁신적인 기술이 융합된 푸드테크로 지속가능한 미래 먹거리 산업에 대한 관심이 증대되고 있다. 빅데이터, 블록체인 및 ICT 융복합 기술을 접목한 3D 프린팅 기술 개발의 필요성이 커지고 있으며, 식품산업의 발전을 모색하기 위한 성장동력으로 각광받고 있다. 그러나, 식품 3D 프린팅 기술의 상용화를 위해서는 식품을 출력하기 위한 3D 프린팅의 보급, 식품소재가 출력되기 위한 기술과 소재의 개발이 절실히 필요하다. 본 연구는 3D 프린팅을 활용한 미래 식품산업 발전을 위한 3D 프린팅 적용 가능한 식품소재 및 식품적용 3D 프린팅 기술을 분석하였으며, 3D 프린팅 기술 개발로 국내외 푸드테크 식품산업 발전을 위한 기술경쟁력 확보에 필요한 연구결과를 분석하였다. 식품 원료의 적용에 따라 적절한 3D 프린팅 기술을 선택하여야 하며, 식품 3D 프린팅 기술 적용에 따라서 노즐의 종류와 출력되는 식품의 구조에 따라 물성 조절이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 3D 프린팅 기술 적용을 위한 식품 3D 프린팅 기술과 식품 소재 적용을 살펴 보았고, 다양한 식품산업에서 미래 먹거리 식품산업으로서의 식품 3D 프린팅 기술을 활용하여 식품 산업 발전에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다.

V. 사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국식품연구원의 기본사업 (E211200-02)의 지원을 받아 수행하였습니다.

VI. 참고문헌

1. 3D Systems. 2013. 3D systems acquires the sugar lab.
2. Anukiruthika T, Moses JA, Anandharamakrishnan C. 2020. 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends. *J Food Eng* 265:109691.
3. Awad A, Fina F, Goyanes A, Gaisford S, Basit AW. 2020. 3D printing: Principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *Int J Pharm* 586:119594.
4. Broad, GM. 2019. Plant-based and cell-based animal product alternatives: An assessment and agenda for food tech justice. *Geoforum* 107:223-226.
5. CandyFab. 2009. The CandyFab project.
6. Cho JH, Moon HY, Kim SY, Choi BG, Oh GW, Joung KY, Kang IP. 2021. A review of 3D printing technology for piezoresistive strain/loadcell sensors. *J Sens Sci Technol* 30:388-394.
7. Dankar I, Haddarah A, Omar F, Sepulcre F, Pujola M. 2018. 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends Food Sci Technol* 75:231-242.
8. Diaz JV, Van Bommel KJC, Noort MWJ, HenketJ, Briër P. 2018. U.S. Patent No. 10,092,030. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. Dick A, Bhandari B, Dong X, Prakash S. 2020. Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food. *Food Hydrocolloids* 107:105940.
10. Dick A, Bhandari B, Prakash S. 2019. Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef. *Meat Sci* 153:9-18.
11. Godoi FC, Prakash S, Bhandari BR. 2016. 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects. *J Food Eng* 179:44-54.
12. Guo C, Zhang M, Devahastin S. 2020. 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation. *J Food Eng* 286:110113.
13. Gwon S. 2021. The current status of smarter food safety management. *Food Sci Ind* 54:124-131.
14. Hao L, Mellor S, Seaman O, Henderson J, Sewell N, Sloan M. 2010. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual Phys Prototyping* 5:57-64.
15. He C, Zhang M, Guo C. 2020. 4D printing of mashed potato / purple sweet potato puree with spontaneous color change. *Innovative Food Sci Emerg Technol* 59:102250.
16. Holland S, Foster T, MacNaughtan W, Tuck C. 2018. Design and characterisation of food grade powders and inks for microstructure control using 3D printing. *J Food Eng* 220:12-19.

17. Hosney RC, Rogers DE. 1990. The formation and properties of wheat flour doughs. *Crit Rev Food Sci Nutr* 29:73-93.
18. Jang JS, Chung JH. 2021. A study on how to make effective digital craft molds using 3D printing technology. *J Digital Convergence* 19:283-288.
19. Jonkers N, Van Dijk WJ, Vonk NH, Van Dommelen JAW Geers MGD. 2022. Anisotropic mechanical properties of selective laser sintered starch-based food. *J Food Eng* 318:110890
20. Kim BK. 2018. 3D printing technology in food industry. Korean Society for Precision Engineering 2018 Proceedings of the Autumn Conference. p 126.
21. Kim HW, Lee IJ, Park SM, Lee JH, Nguyen MH, Park HJ. 2019. Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough. *LWT* 101:69-75.
22. Kim MJ, Kim MK, You YS. 2020. Food 3D printing technology and food materials of 3D printing. *Clean Technol* 26:109-115.
23. Le Tohic C, O'Sullivan JJ, Drapala KP Chartrin V, Chan T, Morrison AP, Kelly AL. 2018. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese. *J Food Eng* 220:56-64.
24. Le-Bail A, Maniglia B, Le-Bail P. 2020. Recent advances and future perspective in additive manufacturing of foods based on 3D printing. *Curr Opin Food Sci* 35:54-64.
25. Lee J. 2021a. A 3D food printing process for the new normal era: A review. *Processes* 9:1495.
26. Lee JY, Kim CH, Kim KW, Lee KA, Koh KO, Kim HS. 2021b. Development of 3D printed snack-dish for the elderly with dementia. *Korean J Community Nutr* 26:327-336.
27. Liu C, Ho C, Wang J. 2018. The development of 3D food printer for printing fibrous meat materials. In *IOP Conference series: Materials Science and Engineering* (Vol. 284, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
28. Liu Y, Saeed A, Lan W. 2019a. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters. *Innov Food Sci Emerg Technol* 54:9-18.
29. Liu Y, Yu Y, Liu C et al. 2019b. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing. *LWT-Food Sci Technol* 102:338-346.
30. Liu Z, Bhandari B, Prakash S, Mantihal S, Zhang M. 2019c. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing. *Food Hydrocolloids*. 87:413-424.
31. Liu Z, Bhandari B, Zhang M. 2020. Incorporation of probiotics (*Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis*) into 3D printed mashed potatoes: Effects of variables on the viability. *Food Res Int* 128:108795.
32. Liu Z, Zhang M, Bhandari B, Wang Y. 2017. 3D printing: Printing precision and application in food sector. *Trends Food Sci Technol* 69:83-94.
33. Mantihal S, Prakash S, Godoi FC, Bhandari B. 2019. Effect of additives on thermal, rheological and tribological properties of 3D printed dark chocolate. *Food Res Int* 119:161-169.
34. Mantihala S, Kobuna R, Lee BB. 2020. 3D food printing of as the new way of preparing food: A review. *Int J Gastron Food Sci* 22:100260.

35. Miyanaji H, Rahman KM, Da MB, Williams C. 2020. Effect of fine powder particles on quality of binder jetting parts. *Addit Manuf* 36:101587.
36. Mostafaei AM, Elliott A, Barnes JE, Li F, Tan W, Cramer CL, Nandwana P, Chmielus M. 2020. Binder jet 3D printing-process parameters, materials, properties, and challenges. *Prog Mater Sci* 119:100707.
37. Nachal N, Moses JA, Karthik P, Anandharamakrishnan C. 2019. Applications of 3D printing in food processing. *Food Eng Rev* 11:123-141.
38. Park MS, Lee YS, Kim KP, Park SH, Han JH. 2019. Actual conditions of the food industry's application of food tech and its tasks - Focusing on alternative livestock products and 3D food printing. Korea Rural Economic Institute. Naju, Korea.
39. Perez B, Nykvist H, Brøgger AF, Larsen MB, Falkeborg MF. 2019. Impact of macronutrients printability and 3D-printer parameters on 3D-food printing: A review. *Food Chem* 287:549-257.
40. Phuhongsung P, Zhang M, Devahastin S. 2020. Investigation on 3D printing ability of soybean protein isolate gels and correlations with their rheological and textural properties via LF-NMR spectroscopic characteristics. *LWT - Food Sci Technol* 122:109019.
41. Pitayachaval P, Sanklong N, Thongrak A. 2018. A review of 3D food printing technology. *MATEC Web Conf* 213:5.
42. Rando P, Ramaoli M. 2021. Food 3D printing: Effect of heat transfer on print stability of chocolate. *J Food Eng* 294:110415.
43. Silva DN, Gerhardt de Oliveira M, Meurer E, Meurer M, Lopes da Silva J, Santa-Barbara A. 2008. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction. *J Craniomaxillofacial Surg* 36:443-449.
44. Singh JS, Koushal S, Kumar A, Vimal SR, Gupta VK. 2016. Book review: Microbial inoculants in sustainable agricultural productivity-Vol. II: Functional application. *Front Microbiol* 7:2105, 7, 2105.
45. Song HY, Min JH. 2021. Bag design for fine dust signal function using 3D printing technology - focused on the application of connectivity design in fabric structural design. *J Korean Soc Des Cult* 47:247-261.
46. Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. 2010. Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Mater Des* 31:287-295.
47. Sun J, Zhou W, Huang D, Fuh JYH, Hong GS. 2015. An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food Bioprocess Technol* 8:1605-1615.
48. Wilson A, Anukiruthika T, Moses JA, Anandharamakrishnan C. 2020. Customized shapes for chicken meat-based products: Feasibility study on 3D-printed nuggets. *Food Bioprocess Technol* 13:1968-1983.
49. Yang F, Zhang M, Bhandari B, Liu Y. 2018. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters. *LWT - Food Sci Technol* 87:67-76.
50. Yang HS, Lee WS. 2022. Integration of conductive metal layers/patterns on 3D printed polymers. *Polym Sci Technol* 33:16-19.

51. Yong HI, Kim TK, Kang MC, Lee MH, Kim MR, Cha JY, Choi YS. 2021. Study on future food tech analysis using alternative proteins. *Korean J Food Cook Sci* 37:416-428.
52. Yoon H, Lee M, Jin X, Kim S, Lee S, Kim Y, You Y, Rhee J. 2016. 3D printing technology and its applications in the future food industry: A review. *Food Sci Ind* 49:64-69.
53. Zhang L, Lou Y, Schutyser MAI. 2018. 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics. *Food Struct* 18:14-22.