

3D 프린팅 기술과 미래식품산업의 응용

3D printing technology and its applications in the future food industry: a review

윤형선^{1,2}, 이미현², 김현연², 김수진², 이소윤², 김연비², 유영선³, 이진규^{2*}

Hyung-Sun Yoon^{1,2}, Mihyun Lee², Xuanyan Jin², Soyeon Lee², Young-Sun You³, and Jin-Kyu Rhee^{2*}

¹㈜쓰리디시스템즈 코리아, ²이화여자대학교 식품공학과, ³가톨릭대학교 생명공학전공

¹3D Systems Cooperation, ²Department of Food Science and Engineering, Ewha Womans University,

³Division of Biotechnology, The Catholic University of Korea

ABSTRACT

The potentialities of 3D printing technology are discussed from technical and research-oriented perspectives for industrial manufacturing of a variety of food products. Currently, 3D printing technology has advanced to enable us to process or cook innovative foods. However, food-based materials for 3D printing are still limited in terms of eating qualities, nutritional values and functionality as well as industrial production. Therefore, this uprising issue on alternative food processing techniques especially focused on the exploration of new food materials combined with these 3D printing technologies needs to be re-spotlighted, and then solved to pave the way to this innovative and sensational area of investi-

gation with more accessibility. In this review, previous research work and industrial applications conducted by frontier research groups in this field are covered, then to open discussion for future research on the 3D printing of food.

Key words : 3D printing, food processing, food materials, innovative foods

서론

x, y 평면에 대한 2차원적인 인쇄술에 z축으로의 적층을 통해 입체물을 생산하는 기술에 대한 연구가 1983년 처음 시작되었고, 그로부터 3년이 지나 최초 특허가 미국의 Chuck Hull에 의해 등록

* Corresponding Author: Prof. Jin-Kyu Rhee, Ph.D.,
Department of Food Science and Engineering, Ewha Womans University,
Seoul 03760, Republic of Korea
Tel: +82-2-3277-4297
Fax: +82-2-3277-4508
E-mail: jkrhee@ewha.ac.kr



표 1. 3D 프린팅의 기술적 측면의 특징 (5,6,8)

장점	제한점
도구 혹은 주형의 제작없이 3차원 입체물을 디지털작업으로 직접 생산 가능	‘인쇄가능’ 재료의 종류가 매우 한정적으로만 적용가능
추가비용의 희생없이 생산물의 디자인 변경 가능	주변 환경적 요인에 대한 인장도 및 재현성이 부족함
추가비용없이 디자인의 복잡도(경량화, 열효율성 등) 증대 가능	생산방식의 한계로 표면가공에 많은 노동과 수고가 필요함
추가노역없이 생산공정의 고도유연적 변경 가능	활용가능한 디자인 도구와 가이드라인이 여전히 모자름
단일공정으로 기능통합적 디자인의 생산 가능	생산속도 및 그 물량이 상대적으로 매우 낮음
투입 원재료 및 공정중 발생하는 폐기물 저감화 가능	소수의 고도 노동기술과 제작경험이 요구됨

되었다(1). 이어서, 신속조형(rapid prototyping)과 동의어처럼 사용되는 “3D 프린터”라는 명명이 MIT 대학의 Sachs에 의해 제안되었으며(2), 30여 년이 지난 최근에 이르러서는 미래의 제조업 기술로 새롭게 주목받고 있다. 이러한 3D 프린터에 대한 개발 및 연구는 프린터 기기 자체의 동작원리나 기술의 발전 및 최적화에 대한 영역과 최근에는 이 기술의 새로운 이용방식 및 적용가능한 신소재 개발에 보다 더 초점을 맞추고 있는 실정이다. 현재 시제품 및 완성품 제작에도 널리 사용되는 3D 프린터는 입체물의 인쇄 혹은 제조방식에 부합되는 재료의 종류에 따라 분류가 가능하다. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Poly-lactic Acid (PLA), photopolymer등을 포함하는 가소성 재료군, sintering기술과 금속파우더 등의 금속 재료군, 이에 더해 다양한 색상이 구현가능한 plaster재료 등이 많이 쓰이고 있으나, 3D 인쇄물 표현의 제한성으로 보다 다양한 재료의 탐색 및 개발에 대한 요구가 여전히 있다. 그럼에도 불구하고 3D 프린터의 장점을 활용하는 새로운 제조공법에 의한 신소재 개발을 목적으로 여러 산업에서 3D 프린터를 적극적으로 도입하고 있으며, 특히 음식 제조기술이나 식품소재 개발에도 이러한 3D 프린터를 활용하려는 시도가 활발하게 이루어지고 있다(3). 현재 공산품의 대량생산을 위해 널리 사용되고 있는 압출(extrusion)이나 사출(injection moulding)같은 전통적인 제조공법

이 식품 가공 및 제조공정에도 널리 도입되어 적용되고 있는 것처럼, 현존의 3D 프린터를 활용한 독자적인 제조공법들이 향후 식품의 생산공정에 분명히 적용될 것으로 예측된다. 이를 위해 많은 연구 그룹들이 다양한 시도를 하고 있으며, 더불어 3D 프린터용 신규 식품소재 개발 역시 진행 중이다. 본 총설에서는 현재 개발되어 사용 중인 여러 종류의 3D 프린터의 종류 및 그 특성을 분류하여 정리하고, 이를 활용한 식품용 3D 프린터 기술 및 식품소재의 연구사례들에 대해 다루고자 한다.

3D 프린팅 기술과 식품제조

현존하는 3D 프린팅 기술

Sun 등은 식품의 대량생산 제조공정에 있어 로봇공학기술과 3D 프린터 기술을 비교하였다(4,5). 일반적인 로봇팔 및 관절은 식품생산공정에 투입되는 경우, 단순 수작업을 대체하게 되어 노동부담의 경감, 인건비 절감 그리고 효율성 증대에 기여한다. 반면, 3D 프린팅 기술은 전자제어에 의한 정밀로봇장치에 의해 상변화 혹은 화학반응에 의존한 적층방식으로 식품을 제조할 수 있다는 큰 차이점이 있다(6,7). 또한, 기존 식품생산과정에서는 형태, 색상, 향, 텍스처, 그리고 영양학적 요소를 고도의 숙련된 조리기술

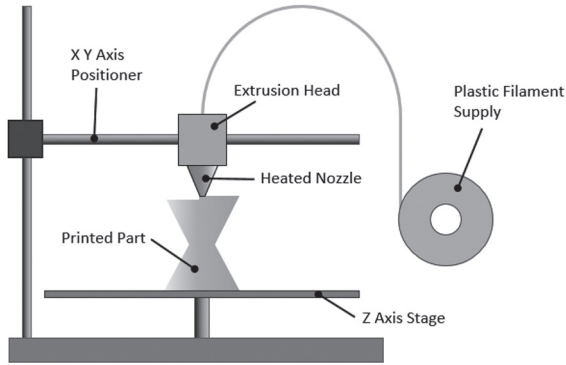


그림 1. Fused Deposition Modeling 방식

자나 그에 의한 분자요리(molecular gastronomy)를 통해 구현해 왔다면, 3D 프린팅 기술은 전산 제어기술과 통합하여 소량 혹은 산업화 스케일로 주문대응형 제조공정에 이용이 가능하다(표 1). 3D 입체조형 제조법은 크게 두 가지의 방식으로 가루나 액체를 굳혀가며 한 층씩 쌓는 적층형(additive manufacturing)과 합성수지 덩어리를 깎아가며 모양을 만드는 절삭형(milling)으로 나뉘지만, 식품의 제조를 위한 3D 프린팅에는 주로 적층형이 사용된다.

압축적층조형(Fused Deposition Modeling, FDM)

현재 가장 대중화되어 개인용 3D 프린터로도 널리 보급된 기술인 FDM 방식은 주로 ABS나 PLA로 이루어진 필라멘트를 노즐을 통해 가열, 적층하여 상온에서 응고시켜 적층하는 방식(그림 1)으로, 식품의 경우 설탕이나 초콜릿을 이용하여 장식용 음식을 조형하는 방법이 시도되었다(9). 온도의 변화에 따른 상태변화를 이용하여 적층하는 FDM방식은 다른 모든 3D 프린터 방식과 마찬가지로 SolidWorks, AutoCAD, Pro/ENGINEER, GeoMagic, Rhino와 같은 CAD (computer aided design) 소프트웨어를 이용하여 원하는 3D 모양으로 디자인 하거나, 역설계(reverse engineering) 및 3D 스캐닝을 통하여 CAD파일을 추출하

는 방식으로 원하는 모양을 자유롭게 디자인 할 수 있는 새로운 식품가공 방식으로 쓰이고 있다. 미국 Cornell 대학의 Fab@Home은 2006년 open innovation project의 일환으로 초콜릿, 쿠키반죽 그리고 치즈를 활용할 수 있는 FDM 방식 3D 프린팅 장비의 보급화를 위해 노력한 대표적 사례이다(10). 싱가포르 국립대의 Daniel Peng Zhuo는 이러한 open-source FDM방식의 3D 프린터에 쿠키도우를 소재로 하여 압출한 결과물을 굽는 방식으로 쿠키를 출력하였으며, 쿠키도우뿐만 아닌 으깬 감자나 초콜릿크림과 같은 압출이 가능한 여러 식재료도 사용할 수 있도록 응용하여 그 성과를 발표하였다(11,12). 이렇게 FDM 방식은 비교적 단순한 원리로 압출이 가능하며 서로 달라붙는 식재료라면 3D 출력이 가능하며 노즐의 개수를 늘려 두가지 이상의 식재료를 함께 사용할 수 있다. 이 방식을 사용하는 미국 Stratasys사의 FDM 프린터는 3가지의 독립 노즐을 사용하여 여러 색이 조합된 입체물을 구현하였다. 노즐에서 압출되어 나오는 순간 고체화가 진행되기 때문에 압출 이후 재료간의 혼합은 어려워 가열된 노즐내에서 혼합하는 방식도 연구되고 있다(13). 단, 노즐의 크기에 따라 해상도가 변하며, 지지대(support)를 추가로 조형해야 하는 단점이 있으며, 재료가 노즐에 달라붙지 않으면서 이미 응고된 하단 적층면과 접촉이 되어 한다는 제약이 까다롭기에 이에 대한 해결책이 요구된다.

염료분사인쇄(Color Jet Printing, CJP)

대부분의 3D 프린터는 적층 제조기법을 사용하여 주조나 절삭과 같은 다른 제조기법에 비하여 재료낭비가 적으며 제품 디자인에 제약이 없다는 장점이 있다. 이러한 CJP이라고 불리는 3D 프린팅 방식 역시 이 두 가지 장점을 살린 대표적인 방식으로, 1993년 MIT에서 개발되어 Z Corp 사로 기술이전되고, 현재는 미국 3D Systems사로 합병되어 재출시된 3D 프린터이다. Z축 적층

표 2. 3D 프린트 방식에 따른 식품 재료 조건

프린트 방식	설명	식품 재료 조건
Fused Deposition Modeling (FDM)	필라멘트 형태의 열가소성 물질을 노즐 안에서 녹여 적층	열을 가했을 때 녹아 노즐을 통해 나올 수 있으며, 상온에서 굳는 재료
Color Jet Printing (CJP)	플라스터 파우더재료 위에 점착제(binder)를 InkJet 방식을 사용, 배합하여 경화 후 적층	파우더 상태의 식용재료 및 파우더와 결합하였을 때 점착성이 있는 액체상태의 식용점착제
Stereolithography (SLA)	액체 UV광경화성수지 표면에 UV laser를 Layer 모양대로 쬐어 경화, 적층	UV에 반응하여 응고가능한 액체상태의 재료
Selective Laser Sintering (SLS)	파우더재료에 laser를 layer 모양대로 쬐어 소결(sintering)하여 적층	Laser로 소결이나 용융이 가능한 파우더 형태의 재료
Digital Light Processing (DLP)	Resin상태의 재료위에 UV DLP를 이용 layer이미지를 투영하여 경화, 적층	UV에 반응하여 응고 가능한 resin상태의 재료
Multi Jet Modeling (MJM)	Resin이나 wax를 piezo printhead를 이용 layer모양대로 분사한 뒤 UV로 경화, 적층	Resin상태로 printerhead를 통해 분사가가능하며 UV에 의해 경화되는 재료

두께는 0.1 mm 내외이며, X와 Y축의 해상도는 600 dpi 이상의 InkJet을 이용하여 가정용 2D 프린터의 해상도와 비슷하게 구현된다. 플라스터 재질의 재료에 InkJet printhead를 이용하여 점착제(binder)를 적층면에 고착하는 방식으로(그림 2) CMYK 색상이 들어간 점착제와 5개의 InkJet printhead를 사용하여 6만 가지 이상의 색상을 구현할 수 있다. 제조과정 중 열처리가 필요없이 파우더 재질의 재료와 점착제의 사용으로, 상태변화를 이용하는 FDM 방식과는 식품재료의 선택이 다르다. 2011년 미국 LA의 건축가 Kyle과 Liz von Hasseln에 의해 설립된 Sugar Lab은 CJP방식

을 응용, 설탕 파우더에 알코올과 물을 섞은 점착제를 뿌리는 방식으로 식용 조형물을 출력하였다(14). 파우더 입자 크기와 InkJet의 결정크기가 작을수록 해상도가 높아지는 CJP 방식의 특성 상 노즐입구 넓이에 해상도를 의존하며, 지지대 형성이 필요한 FDM 방식에 비해 파우더 재료 자체가 지지대 역할을 하는 CJP 방식이 현재까지는 더 정교하고 보다 복잡한 형태의 디자인 조형이 가능하다.

직접적층(Directed Energy Deposition, DED)

파우더나 resin상태의 재료를 layer별로 녹이거나 경화하는 방식으로, 재료를 쌓아가는 FDM 방식이나 재료를 배합하는 CJP와는 달리, 재료에 에너지를 공급하여 적층하는 방식이다. Stereolithography apparatus(SLA) 방식의 경우 미국 3D Systems의 척 헐(Chuck Hull)에 의해 개발된 최초의 3D 프린팅 기법으로 액상 폴리머(liquid polymer) 재료 표면에 레이저를 이용한 자외선으로 하나의 layer를 경화(cure)시켜 쌓는 방식이다(그림 3). 정밀도는 5 μm내외로 현재 가장 정밀한

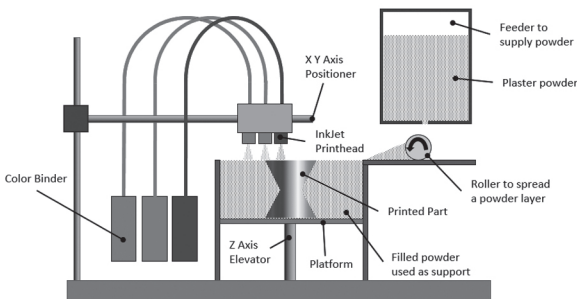


그림 2. Color Jet Printing 방식

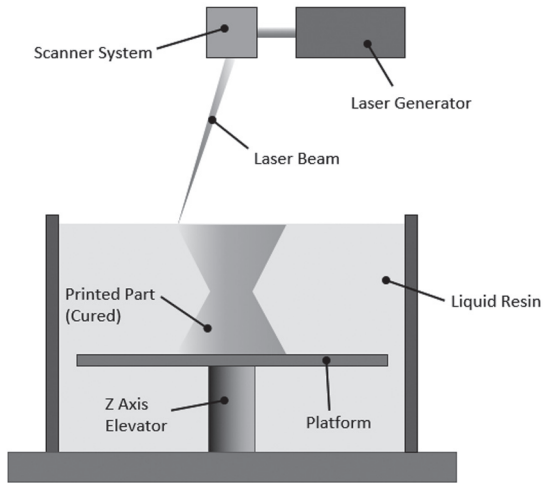


그림 3. Stereolithography 방식

3D 프린팅 방식으로 알려져 있다. Selective laser sintering(SLS)의 경우 SLA와 비슷하나 파우더 재료를 레이저의 열에너지로 소결(sintering)하여 적층하는 방식이다. Digital Light Processing(DLP) 역시 SLA와 비슷한 방식으로 자외선(ultraviolet, UV) 소스를 레이저 대신 빔 프로젝터와 자외선 등(UV lamp)의 결합으로 사용한다. 이러한 세가지 방식을 이용한 식품에 응용한 사례는 아직까지는 발표된 바는 없다. UV경화나 소결이 가능한 식품에 적용할 수 있는 재료가 개발된다면 위 세가지 방식이 식품제조에 도입될 것으로 기대되며, 비슷한 방식을 응용한 식품제작도 가능할 것이다. UV나 소결이 아닌 열에너지를 파우더에 직접 조사하여 녹이는 방식이 미국 Windell Oskay와 Lenore Edman에 의해 시도 되었다. 2007년부터 캘리포니아 소재 Evil Mad Science LLC사에서 수행중인 CandyFab이라는 프로젝트에서 응용된 방법은 입상의 굵은 설탕으로부터 복잡한 형태의 toffee 사탕을 제조하기 위해 설탕가루 위에 온풍기로 직접 열을 가열하여 경화시키는 방식으로 XY축 이동은 FDM의 방식과 유사하게 구성되어 있다(15).

3D 프린팅 기술과 미래 식품산업 적용 전망

이와 같이 현존하는 다양한 3D 프린터를 사용하여 식품제조에 사용하려는 시도가 여러 연구그룹에 의해 진행되고 있다. 현재까지는 각 3D 프린터 방식마다 다른 재료의 적합도라는 현실적인 제약 조건이 있어(표 2), 대부분 시행되는 연구 및 개발 성과들은 기존의 식품을 재현하고 고급화하는데 주로 집중하고 있다. 호주를 비롯 여러나라의 경우, 기술장인에 의해 주로 생산되고 있는 주문생산방식의 고부가가치 케익 시장도 소비자들의 요구를 경제적으로 맞추기 위해 3D 프린팅 기술을 도입한 사례를 소개하고 있다(16).

하지만, 3D 프린터를 이용한 식품제조는 단순히 원하는 모양을 조형할 수 있는 잇점뿐만 아니라 형태, 색상, 향, 텍스처, 영양학적 요소 등의 조합을 정밀하게 제어하여 소량주문이나 식품산업 규모의 제조공정에 이용이 가능하다는 장점을 가지고 있다(5,6,8). NASA의 우주식품개발과제로 유통기한 30년의 영양소로 피자형태의 식품을 제조하는 3D 프린팅 기술, Food Synthesizer를 개발한 앤한 컨트랙터(Anjan Contractor)는 3D 프린터가 미래의 식품제조산업에 가져다 줄 장점으로 각각 다른 영양소가 필요한 남녀노소, 그리고 환자 등, 개개인에게 필요한 영양을 정확히 제공할 수 있는 개인화 영양식(personalized nutrition)이 가능하다고 제시한다(17-19). 더 나아가서는 각자의 요구와 상황에 적합한 텍스처의 제공 그리고 음식물 쓰레기 저감화, 궁극적으로는 미래의 기아문제까지 해결할 수 있는 기술이라고 주장하고 있다. 3D 프린팅 기술에 사용되는 다양한 재료의 경우, 30년이상 보존되는 organic molecule 단위의 sugars, complex carbohydrates, proteins등을 파우더 형태로 만들어 더 오래 보관할 수 있을 것이다. 이를 통해 식품 원료의 낭비를 줄이며 다가올 인구증가에 따른 식량문제를 해소할 수 있게 되어, 궁극적으로는 농수산업 전반에 걸쳐 큰 전환점을 마련할 것이라고 예상된다. 미국 샌프란

시스코 소재 **AlgaVia**사는 바다의 미세조류를 활용하여 대체 단백질원을 공급할 수 있는 식품을 개발중으로 식품기능 및 영양학적으로 매우 우수한 대체 단백질원을 추출, 개발하였다. 이러한 원료를 이용한 제품개발시 소비자의 미세조류에 대한 거부감을 완화하여 제공하는 방안으로 3D 프린팅 기술을 활용한 치킨너겟이나 스테이크와 유사 식감을 가진 대체 축산식품재료의 조형화를 위해 노력 중에 있다.

결론

최근에 이르러 3D 프린팅 하드웨어 기술은 식품 제조산업에 적용가능한 단계로 급속하게 발전되었다. 그러나, 3D 프린터용 식품소재 개발은 주로 식품 장식이나 예술분야에 국한되어 있으며, 공정화를 비롯하여 식감, 영양학적, 기능적 측면의 구현에 있어서는 제한적인 수준에 머물러 있다. 이를 극복하고 미래의 식품가공 신기술로 자리잡기 위해 식품공학계를 비롯하여 기계공학, 컴퓨터 공학, 신소재공학 등 다양한 학제간의 융합연구가 절실한 상황이다.

감사의 글

본 연구는 농림수산식품부 고부가가치식품개발사업(316058), 이화여자대학교 교내연구비 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- Hull CW, Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, U.S. patent 5,204,055 A (1986)
- Sachs EM, Haggerty JS, Cima MJ, Williams PA, Three-dimensional printing techniques, U.S. patent 5,204,055 (1993)
- Yang J, Wu LW, Liu J, Rapid prototyping and fabrication method for 3-D food objects, U.S. patent 6,280,785 (2001)
- Sun J, Zhou WB, Huang DJ, Fuh JYH, Hong GS. An Overview of 3D Printing Technologies for Food Fabrication. *Food Bioprocess Technol.* 8: 1605-1615 (2015)
- Sun J, Peng Z, Yan L, Fuh J, Hong GS. 3D food printing-An innovative way of mass customization in food fabrication. *Int. J. Bioprint.* (2015)
- Weller C, Kleer R, Piller FT. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. *Int. J. Product. Econ.* 164: 43-56 (2015)
- Wegrzyn TF, Golding M, Archer RH. Food Layered Manufacture: A new process for constructing solid foods. *Trends Food Sci. Technol.* 27: 66-72 (2012)
- van Bommel K, Spicer A. Hail the snail: hegemonic struggles in the slow food movement. *Organization studies.* 32: 1717-1744 (2011)
- Hao L, Mellor S, Seaman O, Henderson J, Sewell N, Sloan M. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virtual Phys. Prototyp.* 5: 57-64 (2010)
- Malone E, Lipson H. Fab@Home: the personal desktop fabricator kit. *Rapid Prototyp. J.* 13: 245-255 (2007)
- Sun J, Peng Z, Zhou W, Fuh JYH, Hong GS, Chiu A. A Review on 3D Printing for Customized Food Fabrication in 43rd Proceedings of the North American Manufacturing Research Institution of SME. (2015)
- 3D Printed Food, Are we ready for it? <https://www.3dprintersonlinestore.com/3d-printed-food-are-we-ready-for-it> Accessed Aug. 15, 2015
- The Diamond single nozzle hotend for perfect multi-color 3D printing launches on Kickstarter. <http://www.3ders.org/articles/20150402-the-diamond-single-nozzle-hotend-for-perfect-multi-color-3d-printing-launches-on-kickstarter.html> Accessed Sep. 11, 2016.
- The Sugar Lab by Kyle and Liz von Hasseln. <http://www.dezeen.com/2013/07/04/3d-printed-sugar-cubes-by-the-sugar-lab-kyle-and-liz-von-hasseln/>. Accessed Sep.11 2016.
- The CandyFab Project. <http://candyfab.org/-intro> Accessed Aug. 10, 2016.
- Lipton JI, Cutler M, Nigl F, Cohen D, Lipson H. Additive manufacturing for the food industry. *Trends Food Sci. Technol.* 43: 114-123 (2015)
- Lin C. 3D Food Printing: A Taste of the Future. *J. Food Sci. Edu.* 14: 86-87 (2015)
- The audacious plan to end hunger with 3-D printed food. <http://qz.com/86685/the-audacious-plan-to-end-hunger-with-3-d-printed-food/> Accessed Aug. 15, 2016.
- Why astronaut food is healthier when it is made with a 3D printer. http://www.european-food-journal.com/interviews/why_astronaut_food_is_healthier_when_it_s_is_made_with_a_3d_printer/ Accessed Aug. 10, 2016.