

Review

식품 3D-프린팅 기술과 식품 산업적 활용

김종태* · 맹진수 · 신원선¹ · 심인철² · 오승일 · 조영희 · 김종훈 · 김철진³
한국식품연구원, ¹한양대학교 식품영양학과, ²(주)케미랩, ³신한대학교 식품영양학과

Food 3D-printing Technology and Its Application in the Food Industry

Chong-Tai Kim*, Jin-Soo Maeng, Weon-Son Shin¹, In-Cheol Shim², Seung-Il Oh,
Young-Hee Jo, and Jong-Hoon Kim, and Chul-Jin Kim³

Korea Food Research Institute

¹Department of Food and Nutrition, Hanyang University

²Chemilab Co.

³Industry-University Cooperation Foundation, Shinhan University

Abstract

Foods are becoming more customized and consumers demand food that provides great taste and appearance and that improves health. Food three-dimensional (3D)-printing technology has a great potential to manufacture food products with customized shape, texture, color, flavor, and even nutrition. Food materials for 3D-printing do not rely on the concentration of the manufacturing processes of a product in a single step, but it is associated with the design of food with textures and potentially enhanced nutritional value. The potential uses of food 3D-printing can be forecasted through the three following levels of industry: consumer-produced foods, small-scale food production, and industrial scale food production. Consumer-produced foods would be made in the kitchen, a traditional setting using a nontraditional tool. Small-scale food production would include shops, restaurants, bakeries, and other institutions which produce food for tens to thousands of individuals. Industrial scale production would be for the mass consumer market of hundreds of thousands of consumers. For this reason, food 3D-printing could make an impact on food for personalized nutrition, on-demand food fabrication, food processing technologies, and process design in food industry in the future. This article review on food materials for 3D-printing, rheology control of food, 3D-printing system for food fabrication, 3D-printing based on molecular cuisine, 3D-printing mobile platform for customized food, and future trends in the food market.

Key words: Food 3D-printing, Food fabrication, 3D-printing mobile platform, Molecular cuisine, Customized food

서 론

Three-dimensional (3D) 프린팅은 적층제조(additive manufacturing (AM)) 방법으로 자유스러운 형태의 제작을 목적으로 컴퓨터 모델 프로그램을 활용하여 재료를 한층 한층 겹쳐서 입체적 구조물을 제조하는 기술로서, 최초 산업분야에서 금속, 도자기 및 고분자 원료를 바탕으로 복합구조물을 단일과정을 거쳐 제조하기 위한 목적으로 발명되었다(Hull, 1986). 식품 3D-프린팅 기술의 개념은 Nanotek Instrument 회사가 3D 식품을 신속하게 prototyping 또는 fabrication하여 소비자 맞춤형 생일케익을 제조할 수 있는 특허가 출원되면

서 제시되었다(Yang et al., 2001). 식품 3D-프린팅 기술의 이용은 미국 코넬대학교에서 개발한 Fab@Home Model 1을 사용하여 액상 식품원료를 사용하여 압출성형을 기반으로 3D-프린팅 형태의 제품을 생산한 것이 보고되었으며(Malone & Lipson, 2007), 이후에도 적층가공 기술을 기반으로 식품 성형 설계를 위한 다양한 3D-프린팅 기술개발이 시도되어져 오고 있다(Hao et al., 2010; Grood et al., 2013; Kim, 2014; Kim, 2014; Luisel et al., 2014; Diaz et al., 2015; Fli et al., 2015; Wei et al., 2015). 그러나 현재까지 식품 3D-프린팅 제조에 있어 적층제조 가공기술은 식품이 혼합물(탄수화물, 지방 및 단백질)로 이루어진 점과 이들 성분의 고유한 이화학적 특성으로 인하여 적용하는데 어려운 점이 많은 것으로 지적되고 있다. 3D-프린팅 기술을 식품제조에 활용할 경우 현재까지 아이디어 수준에 머물며 실제 구현이 불가능했던 다양한 모양(3차원적 기하학적 구조와 세밀한 조각형)의 식품제조와 더불어 조직감 및 기호성(향미, 시각)을 부여함으로써 새로운 창의적인 식품제조가 가능하다. 그러나 3D-프

*Corresponding author: Chong-Tai Kim, Research Group of Bioprocess Engineering, Korea Food Research Institute, 1201-62, Anyangpangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13539, Korea
Tel: +82-31-780-9138; Fax: +82-31-780-9257

E-mail: ctkim@kfri.re.kr

Received November 3, 2016; revised November 7, 2016; accepted December 5, 2016

프린팅 기술을 식품제조 산업에 활용하기 위해서는 가식성의 액상, 반고체 및 겔 상태의 식품원료를 3D-프린팅이 가능한 조성물 제조, 식품원료의 물성조절 기술, 3D-프린팅 식품의 상품화 개념 및 최근 소비자 요구(맛, 시각적 품질, 건강 지향적)를 충족시킬 수 있는 소비자 맞춤형 상품에 대한 연구 개발이 요구된다고 할 수 있다. 따라서 본고에서는 식품 3D-프린팅 기술의 상업화를 위한 3D-프린팅 식품 시스템용 원료 조성물 및 물성조절, 3D-프린팅 식품제조 시스템, 3D-프린팅 식품원료, 분자미식 기반의 3D-프린팅 식품성, 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 모바일 플랫폼 및 식품 3D-프린팅 시장전망 등에 대한 내용을 다루고자 한다.

본 론

식품 3D-프린팅 플랫폼

식품 3D-프린팅 플랫폼은 기본적으로 XYZ 3방향 축 지지대, 토출/응고 장치 및 인터페이스로 구성되는데, 컴퓨터로 3개의 축을 구동, 조절 및 원료를 공급하고 실시간으로 3D-식품을 제조할 수 있는 것이다. 즉, 컴퓨터 프로그램 설계와 경로 설정에 의하여 식품성분을 한점 한점 또는 한층 한층 방식으로 쌓아 적층 및 응고시키게 된다. 그러나 새로운 소비자 맞춤형의 3D 식품제조를 위하여 계량(metering), 혼합(mixing), 토출(dispensing), 가열 및 냉각기능을 수행할 수 있는 보조 장치가 필수적이며, 현재까지 시장에서 상용화된 3D-프린터 또는 자체개발 방식에 의한 플랫폼은 토출 및 가열기능 만이 제공되고 있다(Zoran & Coelho, 2011).

기존 산업용 프린터의 경우에는 정교한 디자인과 시제품이라는 성격의 조형물을 만들어야 하는 이유 때문에 1 μm

수준의 선(line) 분해능을 유지하느라 매우 긴 시간에 걸쳐 프린팅을 해야 한다. 하지만 식품용 3D-프린터의 경우는 제조 후 바로 섭취해야 하는 시간적 제한으로 인하여 디자인 보다는 제조시간을 최대한 단축시키는 것이 기술적 극복과 제라 할 수 있다. 물론 3D-프린팅 식품의 정교한 디자인이 소비자의 식욕을 자극하거나 예술성이 부합되어 상품 가치를 높여줄 수는 있으나 궁극적인 식품용 3D-프린터의 목적에는 크게 부합되지 않는다.

일반적으로 축의 구성은 스텝모터를 장착한 직선이동 시스템이 주를 이루고 있으며 이동속도는 산업용과 다르게 매우 빠른 속도를 요구하여 100-200 mm/sec 가량의 이동 속도를 요구한다. 선 분해능은 프린트할 식품재료의 종류에 따라 100 μm-5 mm 정도까지 다양하게 토출시스템이 고안될 수 있다. 식품의 의도와 용도에 따라 토출 시스템에 가열장치가 부착되거나 모양이 형성되는 선반(stage)에 가열장치가 부착되는 경우도 있을 수 있다. 식품 3D-프린터 시스템의 개요도 및 모식도를 Fig. 1과 2에 각각 나타내었다.

식품 3D-프린팅 시스템 구성

토출 시스템에 해당하는 디스펜싱 장치는 전동 또는 공압식 장치가 사용될 수 있으며, 토출 압력과 속도를 자유롭게 조절할 수 있어야 한다. 디스펜서는 토출되는 식재료의 형태와 물성에 따라 다양하게 구성될 수 있는데 주의할 점은 일정한 토출속도와 양을 조절할 수 있도록 점도와 점탄성에 대한 정보를 통하여 설계 및 제작되어야 한다. 토출시스템은 상(phase)에 따라 고체상, 액체상 및 페이스트상에 따라서 응용토출, 액상 syringe 토출, 반고체 압출 토출 방법으로 구분되며, 고체상의 경우는 분말형태로, 액체상은 점도가 5-

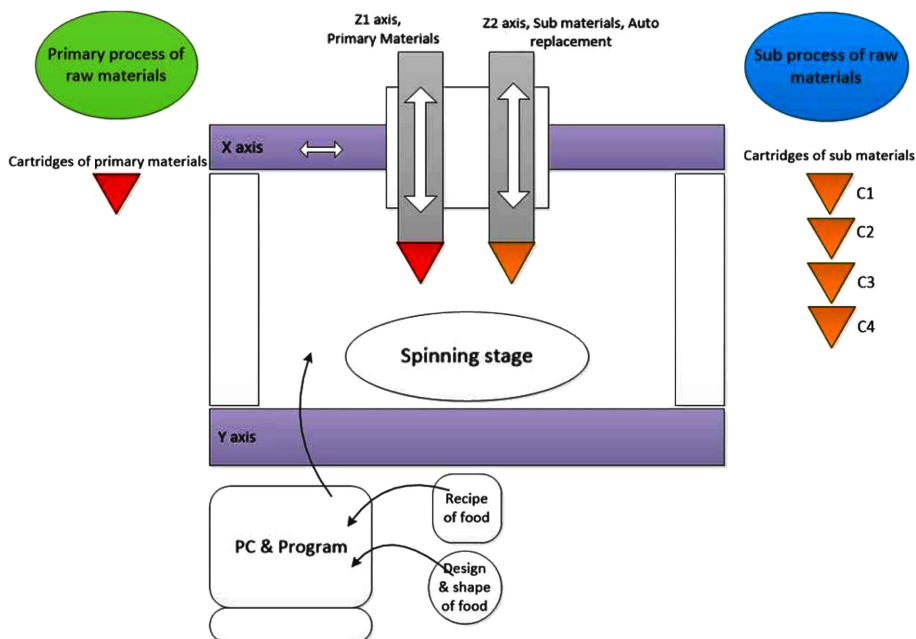


Fig. 1. Characteristic diagram of a new food 3D-printer.

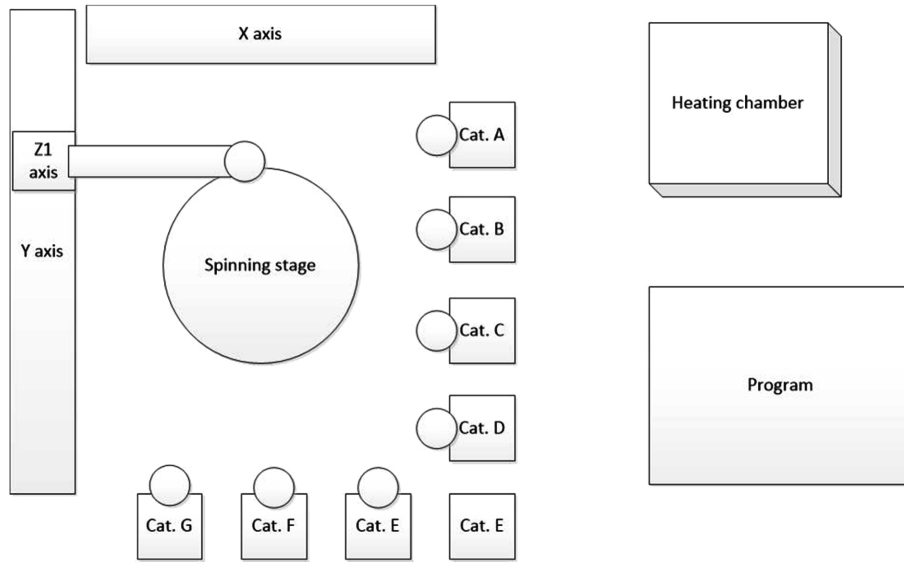


Fig. 2. System diagram of a new food 3D-printer.

100 cPs의 균질상일수록 좋고, 가장 많이 사용될 수 있는 페이스트상의 점도는 500-40,000 cPs 범위가 적절하다. 점탄성 특성은 시간이 경과함에 따라서 전단력 또는 점탄성이 감소하는 특성을 갖는 *thixotropic index*가 지나치게 낮거나 높지 않은 원료 특성이 적절하며, 또한 시간이 경과함에 따라서 전단력 또는 점탄성이 서서히 증가하는 *rheopectic* 특성도 적절한 것이 바람직하다. 가능한 일정한 전단속도를 유지할 수 있는 특성이 유리하며, 이를 만족시키기 위해서는 *ingredient pack*을 구성하는 식품재료의 전처리 과정이 요구된다. 토출 방법은 압출방식과 분말과 결합제를 동시에 사용하여 신속하게 3차원 프린팅 하는 방식이 있으며, 압출방식은 연속식과 비연속식 방법으로 가능하다. 토출은 *syringe pump*, *back-extrusion* 및 *peristaltic pump*를 사용하여 수행할 수 있다.

혼합 및 이송시스템은 소비자 기호에 부합할 수 있도록 입자가 큰 원료와 작은 원료의 혼합을 용이하게 위한 것으로서 혼합속도, 잔여물, 점도 및 균일도 등을 고려해야 하며, 날개형, 반죽형, 롤러형, 스크류형, *static mixer*, *dynamic mixer*, *jet mixer* 및 진동 혼합기 등이 있다. 이송 시스템은 기어 펌프, *Lobe 펌프*, 날개 펌프, *diaphragm 펌프*, 스크류 펌프 및 *metering 펌프* 등이 있다. 3D-프린팅용 식품원료 조성물을 공급 및 유통할 수 있는 *ingredient pack (cartridge)*은 교체가 가능하고 식품원료를 위생적으로 보관할 수 있는 구조로 제작되어야 하며, 적절한 양의 식품원료가 충전될 수 있도록 보통 300-1,000 mL 정도의 용량이 적당하다.

식품 3D-프린팅을 구현하기 위한 프로그램은 크게 3D-이미지의 도입 또는 생성, 이를 장치에서 프린트할 수 있는 파일형태인 STL 또는 OBJ 파일의 생성, 이들 변환된 이미지를 프린터의 벡터 좌표가 인식하도록 하는 *slicing* 과정, *slicing*된 좌표 부분을 G 또는 M code를 이용하여 장치에서 동작하도록 하는 과정 등 각각의 기능에 맞는 프로그램들이

필요하다. 대부분 공개 자료로 제공되어 손쉽게 획득할 수 있으며 저렴한 비용으로 프로그램 패키지를 구성할 수 있다. 단 자신만의 장치고안이 필요하다면 위 프로그램들을 수정 또는 변경할 수 있는 코딩 기술이 필요하다. 3D-프린터는 누구나 쉽게 조작하여 원하는 조성물을 이용하여 디자인할 수 있다는 장점이 있고 기계적 자료도 쉽게 구할 수 있지만 나만의 독특한 장치를 꾸미기 위해서는 많은 노력이 필요하다. 식품용 3D-프린터의 경우 매우 다양한 아이디어와 장치 변형이 필요하며 무궁무진한 식품 조합이 이루어질 수 있기에 꾸준한 연구 개발이 필요하다.

3D-프린팅 식품을 제조에 있어서 식품원료가 프린팅이 가능한 상태(*printability*)의 식품원료의 선정 및 원료특성 정보는 매우 중요한 인자이며, 예비 처리된 원료(분쇄, 변성 전분, 분리 단백질, 분자량 조절 생고분자 등)가 3D-프린팅에 적절하며, 이들 원료는 3D-프린팅 과정에서 원료의 열안정성을 증진시킨다. 식품 3D-프린팅의 과정에서 원료는 흐름성(*flowable*)을 갖는 액체 또는 고체분말 상태로 공급되면서 프린팅 중 흐름성 유지를 위하여 열에 의한 가소화(*plasticization*) 또는 용융(*melting*) 상태로 적층 후 모양을 유지해야 한다. 3D-프린팅 식품의 자체 형태유지는 가역적 가공, 젤화, 프린팅 온도 변화 및 첨가제 사용 등의 방법으로 가능하다. 실질적으로 식품은 다성분계 물질이기 때문에 단백질, 탄수화물 및 지방 성분의 조성비는 3D-프린팅 과정에서 3D-프린팅 식품의 용융거동, 유리전이 및 가소화에 절대적으로 영향을 준다. 물에 의한 가소화 현상은 식품 고분자 원료 즉 전분, 글루텐 및 젤라틴 등에 있어서 유리전이 온도를 낮게 한다(Slade & Levine, 1994; Bhandari & Howes, 1999; Bhandari & Roose, 2003; Haque & Roose, 2006; Roose, 2010).

식품의 유리전이 온도는 탄수화물 즉 단당류(포도당), 이

당류(설탕, 락토스) 또는 다분산 탄수화물(말토덱스트린) 분획 등에 큰 영향을 받게 되는데, 식품 3D-프린팅에 있어 분자량이 큰 탄수화물 고분자는 분자 수준에서의 변형, 가수 또는 겔화제 첨가 등이 없이는 프린팅이 불가능하다. 즉, 말토덱스트린과 같은 고분자는 높은 전이온도(순수 전분 100-243°C)를 갖는데 반해 단당류인 과당-포도당 및 과당의 전이온도는 31°C 및 5°C 수준이다(Bhandari et al., 1997; Adhikari et al., 2000). 전분에 물을 가하고 가열하면 전분의 내부분자 결합이 파괴되어 수소결합 부위에 보다 많은 물이 결합되게 되어 호화현상이 발생하며, 수분 함량이 낮은 조건에서 당류는 전분과 공존용질(cosolute) 역할을 함과 동시에 전이온도를 낮춘다. 따라서, 식품 3D-프린팅에서 토출 후 토출물의 형태유지를 위하여 전이온도를 조절하는 것은 매우 중요하다.

용융압출 방식의 3D-프린팅에 의한 초코릿의 프린팅은 당류의 결정화가 중요한 인자인데, 압출시 밀크 초코릿, 설탕 및 락토스 성분이 완전하게 결정화 된다. 이때 완전한 결정화는 지방에 갇혀 남아 있는 무정형 유리당을 감소시키는 유리한 점이 있다. 즉, 지방 함량을 줄이는 것은 최종 초코릿 제품의 점도를 조절하는데 필요한 사항이다. 전이온도 이하에서 물에 설탕이 존재할 때 점도는 증가하게 되는데, 이는 많은 결정핵들이 성장하게 하는 작용을 한다. 무정형의 당으로부터 지방을 방출하면 전체적인 지방 함량은 이상적인 점도가 감소하는 것에 도달하는 것이 요구되기 때문에 초코릿 제조는 보다 용이하다(Goncalves & da Silva Lannes, 2010).

분체를 결합시키는 공정에 있어서 입자 성분의 주성분은 당이 차지하게 되는데, 식품 3D-프린팅의 적층기술은 원료의 용융온도를 조절하여 식품원료 물질의 층과 층 사이의 상호작용을 유도하는 방법이다. 이때 분체의 밀도와 압축도가 분체의 흐름성과 가열과정에서 용융체 형성에 중요한 인자임과 동시에, 또한 프린터내에서 설탕 분말의 흐름성과 식품 원료 분말의 습윤성(wettability)은 액상 3D-프린팅 과

정에서 중요 인자로 작용한다. 흐름성은 특히 분체 원료가 펼쳐지면서 얇은 층을 형성되게 하는 역할을 하게 되는데, 낮은 흐름성은 재피막(recoating)이 충분하게 일어나지 않으며, 높은 흐름성은 불안정한 분체층을 형성한다. 입자의 습윤성 또한 분체층으로 분산되는 겔착제의 용량과 프린팅 식품의 재용해 및 물리적/구조적 특성을 결정짓는 겔착제 입자의 양의 척도로 작용한다. 미세 입자의 낮은 습윤성은 분체층의 재배열을 동반하고, 높은 습윤성은 느린 분체반응과 함께 아주 작은 입자를 감소시킨다. 분체입자 크기는 수분에 결합된 겔착제의 소량 침투거동에 영향을 주는 용적밀도와 기공 크기분포에 작용하는 또 다른 중요한 인자이다. 이러한 식품분체와겔착제와의 상호작용은 겔착력과 화학반응과 관계가 있다(Shirazi et al., 2015).

액상 식품원료를 이용한 식품 3D-프린팅에서 하이드로콜로이드는 식품성분과 겔화기작을 통하여 결합시킴으로써 프린팅 식품용 원료 혼합물의 다양한 물성을 제공할 수 있다. 하이드로콜로이드는 식품분체조성물을 결합시킬 뿐만 아니라, 프린팅 과정에서 분체층으로 액상분산의 흐름과 물질이동 조절을 증진시키는 역할을 한다. 식품산업에서 폭 넓게 이용되고 있는 잔탄검과 젤라틴으로 조합되는 혼합물에 향미를 첨가하여 폭 넓은 조직감을 갖는 식품제조에 활용할 수 있다. Table 1에 유동식품 및 시판 식품 종류에 따른 항복응력, 정적 항복응력 및 동적 항복응력값을 나타내었다.

식품 단백질은 양전하와 음전하를 띠는 관능기를 함유하는 여러 가지 아미노산의 혼합물로서, 단백질 고분자는 단백질 용액의 pH와 등전점(isoelectric point)에 따라서 양전하 또는 음전하를 띠는 특성을 보인다. 등전점에서 단백질은 서서히 회합(aggregation)을 하게 되는데, 이러한 현상은 입자 상태의 겔화 및 하이드로 겔 형성 기작에 의하여 구현되는 액상 단백질 식품 3D-프린팅의 특징이라고 할 수 있다. 식품 단백질을 젤라틴 또는 알긴산과 같은 다당류 물질과 함께 3D-프린팅의 적층 삽입방법으로 가공하면 새로운 조직감을 갖는 단

Table 1. Yield stress, static and dynamic yield stress of fluid foods and food products

| Product | Yield stress (Pa) | Static yield stress (Pa) | Dynamic yield stress (Pa) | References |
|-----------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Ketchup | 22.8 | | | Ofoli et al. (1987) |
| Mustard | 34.0 | | | Ofoli et al. (1987) |
| Apricot puree | 17.4 | | | Ofoli et al. (1987) |
| Milk chocolate | 10.9 | | | Ofoli et al. (1987) |
| Mayonnaise | 1600-2300 | | | Ofoli et al. (1987) |
| Tomato paste | 83.9-84.9 | | | De Kee et al. (1980) |
| Applesauce | 58.6 | | | Charm (1962) |
| Mustard | 52-78 | | | Campanella & Peleg (1987) |
| Applesauce | 45-87 | | | Campanella & Peleg (1987) |
| Ketchup | 26-30 | | | Missaire et al. (1990) |
| Tomato puree | | 34.4±3.7 | 28.1±4.2 | Yoo et al. (1995) |
| | | 30.0±4.2 | 27.6±3.4 | Yoo et al. (1995) |
| Apple sauce | | 77.3±0.0 | 48.2±4.7 | Yoo et al. (1995) |
| | | 48.2±4.7 | 38.0±4.7 | Yoo et al. (1995) |
| Tomato ketchup | | 51.3±5.0 | 40.6±4.5 | Yoo et al. (1995) |
| | | 43.2±3.4 | 39.6±3.4 | Yoo et al. (1995) |
| Spaghetti sauce | | 26.3±4.5 | 18.3±0.0 | Yoo et al. (1995) |
| | | 24.8±3.4 | 21.9±0.0 | Yoo et al. (1995) |

백질 가공식품을 제조할 수 있다. 또한, 식품 단백질은 고기에 transglutaminase 같은 효소를 식품첨가제로 첨가하여 구조변환을 통한 3차원 구조의 변형단백질 제품을 제조할 수 있다. 단백질 식품 3D-프린팅에서는 고기 puree에 transglutaminase를 프린팅 직전 작용시켜 물성은 유지되면서 새로운 단백질 매트릭스를 갖는 식품개발 연구가 시도 되었다(Lipton et al., 2010). 이같은 결과는 transglutaminase에 의해 칼슘이 존재하는 조건에서 lysine과 glutamine 단말기 사이의 공유결합을 분해하기 때문인 것으로 설명된다. 따라서 고기 puree에 존재하는 단백질은 효소적 가교결합으로 이루어져 있기 때문에 자립(self-supporting) 하이드로겔이 형성할 수 있는 특징이 있으며, 이러한 사실은 식품 3D-프린팅에 의하여 새로운 조직감을 갖는 고기 제품개발이 가능하다는 것을 입증한다. 젤라틴은 콜라겐의 섬유상 구조를 비가역적 붕괴를 통하여 얻을 수 있는 단백질로서, 식품 3D-프린팅 원료로 사용할 수 있는 유용한 소재로서, 젤라틴 겔은 입안에서 잘 녹는 독특한 조직감을 갖고 있어 식감과 향미를 쉽게 인지할 수 있게 한다. 젤라틴 입자를 온수(40°C)에 수화시키면 유연한 단일 random coil을 형성하여 잘 녹게 되며, 냉각하면 polypeptide 사슬의 작은 조각이 콜라겐 triple-helix-like 구조로 복귀되면서 겔화를 거쳐 접합영역이 형성된다. 젤라틴은 묽은 용액상태에서 전하를 띠는 관능기가 존재할 때 뉴턴성 흐름을 나타내기 때문에 식품 3D-프린팅의 압출방식으로 젤라틴을 원료로 식품 제조에 적용할 경우 분자의 전하는 용액의 점도에 영향을 미치는 사실을 인지해야 한다. 한편, 양전하 및 음전하가 동시 존재할 때 등전점에서 분자는 완전하게 수축되어 최저 점도를 보인다.

식품 3D-프린팅은 식품재료에 열과 혼합 및 반죽 등과 같은 물리적 전단력이 수반되는 가공정으로 이 과정에서 발생하는 힘(force), 변형(deformation), 온도 및 가공시간 등과 같은 공정인자와의 관계를 구명하는 레올로지 특성분석은 최종 생산 3D-프린팅 식품의 생산과 품질관리를 위하여 매우 중요하다. 식품에 있어 레올로지를 보다 세밀하게 정의한다면 점도를 갖는 액상식품계의 흐름거동(flow behavior)을 분석하는 것인데, 점도는 다양한 형태의 유체를 구별할 수 있을 뿐만 아니라 많은 식품의 관능적 선택에 있어 중요한 인자이다. 액체식품 또는 검(gum)류의 하이드로콜로이드 용액은 전단속도(shear rate), 전단력(shear force) 및 점도 등과 같은 물성 및 상호관계 분석을 통하여 특성분석이 가능하다. 대부분의 검용액과 액체식품은 이상적(ideal) 또는 뉴턴 거동을 보이지 않고 비뉴턴 유체특성을 보인다. 뉴턴 유체는 전단속도에 비례하여 전단응력(shear stress)이 변하는 유체로서 주어진 온도에서 이 유체의 점도는 전단속도와 전단력에 영향을 받지 않는다. 뉴턴 유체 식품은 설탕시럽, 쇠고기 맑은 수프, 비알콜성 음료 및 우유 등이 이에 속한다. 한편, 비뉴턴 유체는 대부분의 액체식품이 이에 속하며 전단강도는 전단속도에 비례하지 않는다. 모든 흐름거동을 갖는 식품의 전단강도와 전단속도와의 일반적인 관계를 아래와 같은 power law식으로 나타낼 수 있다.

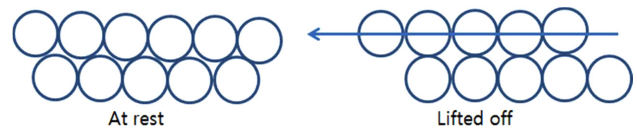


Fig. 3. Structural changes in Bingham plastic system (Glicksman, 1982).

$$\tau = b\dot{\gamma} + C$$

여기서, τ = 전단응력, $\dot{\gamma}$ = 전단속도, b = 농도 상수 및 C = 항복값(yield value)을 의미한다.

식품산업에 있어 중요하게 취급되는 비뉴턴 유체는 Bingham plastic, 유사 가소성(pseudoplastic), dilatant, thixotropic 및 rheolectic 등과 같은 5가지 형태로 분류할 수 있다. Bingham plastic은 전단강도와 전단속도가 상쇄 및 직선관계를 갖는 유체로서 초기 유체 저항은 항복값에 도달하며, 이동이 시작할 때 유체물질은 뉴턴유체와 같은 거동을 보인다. Bingham plastic의 구조변화는 Fig. 3과 같으며 안정하게 형성된 유체로부터 정지된 입자를 움직이는 힘(항복값)이 나타나는 것을 알 수 있으며 곧 유체는 뉴턴 유체와 같은 흐름을 보인다. 즉, 안정된 상태에서 응집체 구조에 있는 입자는 입자간 결합으로 유지되나 전단력이 가해지는 과정에서 파괴되게 된다. 전단력이 가해지는 과정에서 입자는 다른 입자로 이동되며 물질 전체가 흐르게 된다. 토마토 케첩이 대표적인 Bingham plastic 특성 유체이다(Glicksman, 1982). 유사 가소성 유체는 교반 또는 전단력을 가하면 쉽게 흐르는 특성을 보이며, 일반적으로 전단속도가 증가하면 점도가 감소하나 비례적으로 증가하지는 않는다. 이러한 유체흐름은 유체 내부에서 구조적인 변화로 인하여 형성되며 점도의 감소는 유체 분자의 가지런한 정렬에 의한 것이다. 이 유체는 낮은 전단속도에서 분자는 정렬이 제대로 일어나지 않고 일부분만이 정렬되며 궁극적으로 점도가 높아지게 된다(Fig. 4). 전단속도를 증가시킬수록 분자는 정렬되며 내부 마찰이 감소하게 되는데 이 현상은 점도가 낮아지는 것을 의미한다. 유사 가소성 유체의 이러한 과정은 전단력이 정지 후 분자들 간에 정렬이 되지 않는 것을 감안하면 가역적 과정으로 볼 수 있으며, 유체시스템은 곧 원래의 농도 및 점도로 유지하게 된다(Fig. 5). 유사 가소성 유체 특성을 보이는 물질은 매우 일반적인데 대부분의 예멀전 및 검 용액이 이에 해당한다(Glicksman, 1982).

Dilatant 물질은 전단속도를 증가시키면 점도가 증가하는 특징을 보이며 일부는 유체가 고체로 변하게 된다. 안정된 상태의 dilatant 유체는 구성 입자들이 치밀하게 충전된 상태로 존재하며, 전단력이 전달될수록 입자의 분리가 일어나게 된다. Thixotropic 유체는 가역적 gel-sol-gel 전이(transition) 특징을 갖는 시스템으로서 gel 구조를 교반 또는 혼합하면 sol로 변하며 분산되지 않은 일부가 존재하게 되면 gel이 다시 형성된다. 따라서, 요변성(thixotropy)은 교반이 점도를 감소시키며 일정 기간 안정상태를 유지하면 본래의 점도로 복

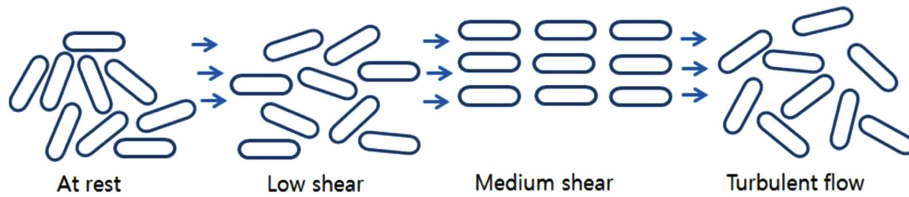


Fig. 4. Structural changes of pseudoplastic materials (Glicksman, 1982).

원된다는 것으로 특징된다. Rheoleptic 유체는 전단력과 전단속도를 증가시킬수록 점도가 증가하는 shear-thickening 및 구조 고체화 되는 특징을 보이고 시간의존성이 있으며, 식품에서 달걀 흰자의 교반 또는 whipping cream 형성에서 관찰할 수 있다.

3D-프린팅 기술을 이용한 식품제조를 고려할 경우 상기에 서 기술한 다양한 유체의 레올로지 특성을 기본으로 식품에 있어 검류의 흐름특성에 영향을 주는 인자인 점도특성, 농도, 온도, 분자량, 전단속도, 전단강도, pH 및 이온 등이 복합적으로 연구되어야 할 것으로 판단한다.

분자미식 기반의 3D-프린팅 식품

분자미식학은 조리과정 중에 일어나는 물리 화학적 변화를 탐구하여 음식의 조직과 질감, 요리과정을 과학적으로 분석하고 재해석하여 새로운 맛과 질감을 만들어 내는 학문 분야이다.

이러한 분자미식학적 이론과 기술을 기반으로 기존의 방식으로 조리한 음식의 질감과 구조를 분석하여 3D-프린팅용 기법에 적용하는 단계가 필요하다. 예를 들어, 식재료가 원래 가지고 있는 구조, 질감, 풍미를 충분히 이해하고, 조리과정 중에 유입되는 다양한 방법들(섞기, 휘젓기, 소금첨가, 끓이지, 굽기 등)에 의해 일어나는 변화들을 정량적으로 해석하는 것이 첫 번째 단계이다. 이어서, 3D-프린터에 적용할 수 있는 형태의 식재료 형태(분말, 액체, 페이스트 등)와 동반하는 맛 첨가요소(소금, 감미료, 향미제 등)의 적절한 비율 등을 결정하는 것이 필요하다. 이 단계가 음식이 원래 가지고 있는 질감과 구조 속성을 완전히 해체하여 새로운 형태로 재구성하는 해체주의적(deconstruction) 속성이 도입되며, 원래의 맛과 풍미를 보존해야 하는 과제를 해결해야 한다. 따라서, 본래의 음식이 가지고 있던 맛과 풍미를 살려내기 위하여 적절한 첨가물을 이용할 수 있다.

그럼, 3D-프린터를 이용해서 어떤 창의적인 음식을 구현해 낼 수 있을까? 이미 미국의 항공우주국(NASA)는 우주비행사들이 장기간 우주에 머무는 동안에 적절한 영양소배합이 된 음식을 우주선내에서 손쉽게 프린팅해서 먹을 수 있도록 3D-프린팅 식품개발에 박차를 가하고 있으며(Open NASA, 2016), 초콜릿 회사인 허쉬(Hersh)도 3D-프린터 업체와 협력으로 ChocoJet 3D-프린터를 이용하여 초콜릿종류(밀크, 다크, 화이트 초콜릿)와 원하는 디자인을 선택하면 맞춤형 초콜릿을 출력할 수 있는 상품을 개발하고 있다(Brick, 2016). 또한, 독일 벤처업체인 ‘Biozoon’에서 개발한 3D-프린

팅 한 음식은 젤리형태의 닭고기 구이, 소스 등의 ‘스무디푸드(Smoothfood)’로 연하곤란 장애를 가진 환자나 저작기능이 저하된 노년층을 위한 질감개선 요리로서 EU연구지원금을 받아 진행된 ‘노년층을 위한 개인 맞춤형 영양식’ 프로젝트의 결과물이다(Michail, 2016). 유럽의 내츨렐머신즈에서 개발하여 상용화한 3D-프린터인 푸디니(Foodini)는 신선한 재료들을 사용하여 영양소균형이 맞는 음식제작이 가능하다고 발표했다. 다시 말해, 원료가 되는 재료는 카트리지의 조합에 의해 구성될 수 있으며, 맛, 모양, 사이즈를 쉽게 변화시킬 수가 있어서 소비자취향에 맞는 혁신적인 제품생산이 가능할 것으로 보인다. 실 예로, 몬텔레즈인터네셔널에서 기존의 오레오에 라임, 민트맛등을 첨가한 새로운 오레오쿠키를 단지 2분 내에 생산하였다. 이러한 시도들은 분자미식학에서 기반을 두고 있는 개념인 “지적 자극을 통해 상상력을 극대화시키고, 재료의 구조해체와 재구성으로 일어나는 질감 변화를 통해 즐거운 상상력과 미지의 맛에 대한 탐구심을 유발하는” 것과 맥락을 함께 한다.

소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 모바일 플랫폼

3D-프린터의 가장 큰 장점 중 하나인 맞춤형 제조 및 생산이 가능해짐에 따라 3D-프린터를 이용한 식품·의료 서비스 시대가 본격적으로 시작되고 있다(Norman et al., 2016). 개인별로 유전자 정보와 같은 신체적 특성을 비롯하여 생활 습관 및 행동패턴이 모두 다르기 때문에, 식이요법이 필요한 환자에게는 개인 특성에 최적화된 식품 처방전이 필수적이며, 이를 제조하는데 3D-프린팅이 큰 역할을 담당할 수 있다. 또한 의료정보의 축적으로 빅데이터가 형성되어 이를 이용한 맞춤형 식단 설계가 늘어나고 있다(Chawla & Davis, 2013). 이렇게 설계된 식단을 효율적으로 제조하기 위해 식품의 3D-프린팅이 도입되고 있으며, 최근에는 3D-프린터의 기술 발전과 이에 따른 3D-프린터용 식품원료가 다양해지면서 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 연구가 식품분야의 새로운 연구분야로 확대되고 있다(Sun et al., 2015).

향후 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅은 식이요법이 필요한 가정으로의 보급이 예상되고 있으며, 이러한 경우 환자에게 적합한 영양식 선택과 식품 3D-프린팅을 위한 통합 프로그램이 필요하다. 통합 프로그램은 사용자의 신체 상태를 실시간으로 수집하거나 사용자에 의해서 쉽게 입력될 수 있는 모바일 타입의 user-friendly 인터페이스 형태가 요구되며, 입력 정보를 통해 자동으로 사용자에게 적합한 식단을 도출할 수 있도록 전문가의 지식이 대체 가능한 전문가 시스템

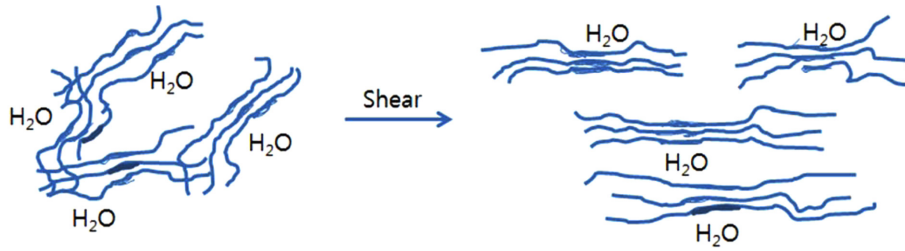


Fig. 5. Pseudoplastic flow at rest and under shear (Glicksman M. 1982).

및 결정된 식단을 소비자가 간편하게 획득하기 위한 3D-프린팅 시스템이 수반되어야 한다. 현재 이러한 전체 과정을 포괄하는 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 모바일 플랫폼에 관한 연구가 도입되고 있다(Yang et al., 2015).

소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 모바일 플랫폼은 환자 또는 소비자 상태에 대한 최적의 식단 결과 정보와 소비자 만족도 피드백 정보 등을 취합하여 데이터베이스화하고, 해당 정보는 클라우드에 업로드되어 즉각적으로 전문가시스템 업데이트가 가능한 장점을 갖는다. 특히 소비자에게 주문 시기와 지역이 고려된 맞춤형 레시피를 제공하기 위하여 신체 정보뿐만 아니라 기후 및 시장 정보를 사물인터넷(Internet of things; IoT) 기반의 디바이스로 수집 후 클라우드(Cloud)에 빅데이터(Big data)로 저장하고, 이렇게 모인 클라우드 데이터는 분석을 통해 모바일(Mobile)로 소비자에게 정보를 제공하는 구조를 형성한다. 이러한 ICBM (IoT-Cloud-Big data-Mobile) 아키텍처는 인공지능과 결합하여 수요예측 알고리즘을 통해 레시피 자동 추천 전문가시스템을 구축하며, 사용자는 모바일 디바이스의 친화형 유저인터페이스를 통해 쉽게 주문, 구매, 결제하고, 주문이력은 자동 저장되어 다시 클라우드와 연동되는 순환형 구조를 갖는다(Fig. 6).

ICBM 플랫폼은 다수의 사용자에게 의해 동시다발적으로 발

생하기 때문에, 이를 관리하기 위한 상위 플랫폼의 설계가 필요하다. 상위의 관리 플랫폼은 다수의 사용자가 식품 3D-프린팅 시스템을 통해 맞춤형 서비스를 제공받기 위한 데이터 입/출력을 통합하는 역할을 수행하며, 이를 위하여 대용량 데이터의 처리 및 분산 네트워크 구축, 푸시를 통한 사용자 피드백 체크, 복수의 이해관계자 접근을 위한 데이터 송수신 인터페이스 등 다양한 모듈 개발에 대한 연구가 요구된다(Fig. 7).

식품 3D-프린팅 시장 전망

미래 식품산업에서 식품 3D-프린팅 기술의 파급은 큰 파장을 일으키며 발전할 가능성이 클 것으로 예상되고 있다. 즉, 식품제조업 분야에서 현재와 가까운 미래에 신속한 상품생산 및 소수 전문가 생산이 식품산업에서 시작되며 식품 유통산업 분야에서는 3D-식품제조업체의 틈새시장 공략이 시작될 것으로 예측된다. 또한 향후 3D-식품의 생산과 시장 진출에 이은 시장수요가 급증할 것으로 예측되며, 식품 생산설비의 공유가 필요하지 않고 직접생산 및 식품디자인 공급과 더불어 본격적인 3D-식품의 시장진출과 비즈니스 모델이 형성될 것으로 예상된다.

몇 가지 예를 들어보면 현재 계층분석에 의해 개인별 맞춤



Fig. 6. The customized ICBM (IoT-Cloud-Bigdata-Mobile) platform for food 3D-printing.

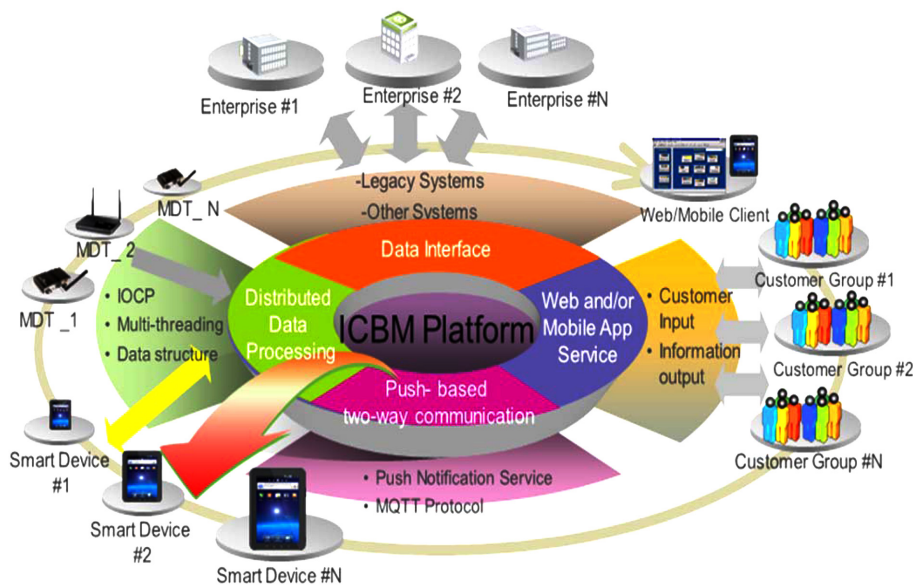


Fig. 7. The data processing architecture of ICBM platform.

형 의료가 가능해졌다. 이는 바꾸어 말하면 개개인의 질병을 예측할 수 있게되는 것이고 이를 예방하기 위해서는 맞춤형 의료와 함께 맞춤형 영양에 대한 컨설팅이 필요하다. 이에 영양관리를 위한 개별맞춤형 3D-프린팅 제품에 대한 수요가 창출될 것이고, 3D-프린팅 영양컨설팅 프로그램 개발이 필요할 것이다. 식품 제조와 유통 분야에서 신성장 미래형 산업으로 급속한 발전에 의한 새로운 시장 창출과 국내 경제의 활성화와 함께 21세기형 식품소비자의 소비 성향에 부응함으로써 식품관련 신문화 창출과 연관 산업의 발전이 예상된다. 나아가 소비자 주도형 3D-식품제조 플랫폼에 의한 미래 유망산업의 다른 한 분야인, ‘집단지성(crowdsourcing)’에 의한 집단생산(peer production) 방식의 적용에 의한 새로운 시장이 형성될 수 있을 것이다. 아울러 소비자 선택형 3D-식품제조 플랫폼에 의하여, 식품성분의 효능과 영양대사 및 건강 관련 데이터베이스의 온라인 제공에 따른 소비자의 선택적 제조 요구가 실시간 반영되는 온라인 시스템이 가능한 미래형 소비자 요구형 및 맞춤형 시장이 형성될 것으로 예상된다. 다시 말하면 소비자들의 다양한 기호성 요구와 식품성분 효능 관련 전문정보 제공에 따른 건강기능성 요구가 생산 단계에 온라인으로 반영되는, 21세기 소비자 맞춤형의 식품3D-프린터 전문 푸드스토어 체인 생성에 의한 신성장 산업화가 가능하다.

그리고 식품 3D-프린팅산업은, 가정간편식(HMR) 선호, 음식의 온라인 및 O2O 서비스 선호, 1인 가구와 노령인구 증가, 식품의 건강기능성 중시, 새로운 첨단기술 선호 등의 21세기 식품소비자의 성향에 부합하는 특성을 갖고 있어 미래 유망산업으로의 조속한 성장이 예상된다. 또한, 노인인구의 급격한 증가로 맞춤형 노인식품과 건강증진용 특수식품의 수요가 증가할 것이다. 소수의 건강한 노인을 제외하고는 많은 노인들은 1종류 이상의 대사증후군과 신체퇴화현상(관절, 치

아, 인지 등)에 따른 질병을 지니고 있어 이를 관리할 수 있는 개별 맞춤형 3D-프린팅 식품수요가 늘어날 것이다. 미래의 노인은 IT생활에 익숙하여 다양한 정보와 물품구매를 모바일웹기반에서 수행 할 것으로 예상되며, 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅 ICBM 플랫폼의 잠재 고객이 될 것이다.

따라서, 향후 식품산업에서 3D-프린팅 식품생산 및 판매를 통한 시장을 개척하기 위해서는 현재 소비되고 있는 다양한 종류의 식품의 다성분계와 동등한 품질 및 식감을 제공할 수 있는 식품 재조합, 소비자가 설계한 3D-프린팅 조합식품, 소비자 개인이 원하는 원료를 가지고 다양한 식품 모양과 조합으로 3D-프린팅을 통하여 제조하여 소비할 수 있는 개인 식품공장 그리고 소비자가 원하는 영양소를 제공할 수 있는 3D-프린팅 식품의 개념이 설정되어야 발전 가능성이 있다고 생각한다.

결론

3D-프린팅 기술을 식품제조에 활용할 경우 현재까지 아이디어 수준에 머물며 실제 구현이 불가능 했던 다양한 모양(3차원적 기하학적 구조와 세밀한 조각형)의 식품제조와 더불어 조직감 및 기호성(향미, 시각)을 부여함으로써 새로운 창의적인 식품제조가 가능하다. 그러나 3D-프린팅 기술을 식품제조 산업에 활용하기 위해서는 가식성의 액상, 반고체 및 겔 상태의 식품원료를 3D-프린팅이 가능한 조성물 제조, 식품원료의 물성조절 기술, 3D-프린팅 식품의 상품화 개념 및 최근 소비자 요구(맛, 시각적 품질, 건강 지향적)를 충족시킬 수 있는 소비자 맞춤형 상품에 대한 연구개발이 요구된다고 할 수 있다.

3D-프린팅 식품을 제조에 있어서 식품원료가 프린팅이 가능한 상태(printability)의 식품원료의 선정 및 원료특성 정보

는 매우 중요한 인자이며, 예비 처리된 원료(분쇄, 변성 전분, 분리 단백질, 분자량 조절 생고분자 등)가 3D-프린팅에 적절하다. 식품 3D-프린팅의 과정에서 원료는 흐름성(flowable)을 갖는 액체 또는 고체분말 상태로 공급되어 열에 의한 가소화(plasticization) 또는 용융(melting) 상태로 적층 후 모양을 유지해야 한다. 3D-프린팅 식품의 자체 형태유지는 가역적 가공, 겔화, 프린팅 온도 변화 및 첨가제 사용 등의 방법으로 가능하다. 실질적으로 식품은 단백질, 탄수화물 및 지방 성분 등으로 구성된 다성분계이기 때문에 이들 성분의 조성비에 따라서 3D-프린팅 과정에서 용융거동, 유리전이 및 가소화 등이 진행되며, 이를 조절할 수 있는 방법이 핵심기술이 될 수 있다.

분자미식학은 조리과정 중에 일어나는 물리 화학적 변화를 탐구하여 음식의 조직과 질감, 요리과정을 과학적으로 분석하고 재해석하여 새로운 맛과 질감을 만들어 내는 학문 분야이다. 이러한 분자미식학적 이론과 기술을 기반으로 기존의 방식으로 조리한 음식의 질감과 구조를 분석하여 3D-프린팅용 기법에 적용하는 단계가 필요하다.

향후 소비자 맞춤형 식품 3D-프린팅은 식이요법이 필요한 가정으로의 보급이 예상되고 있으며, 이러한 경우 환자에게 적합한 영양식 선택과 식품 3D-프린팅을 위한 통합 프로그램이 필요하다. 통합 프로그램은 사용자의 신체 상태를 실시간으로 수집하거나 사용자에게 의해서 쉽게 입력될 수 있는 모바일 타입의 user-friendly 인터페이스 형태가 요구되며, 입력 정보를 통해 자동으로 사용자에게 적합한 식단을 도출할 수 있도록 전문가의 지식이 대체 가능한 전문가 시스템 및 결정된 식단을 소비자가 간편하게 획득하기 위한 3D-프린팅 시스템이 수반되어야 한다.

현재 계층분석에 의해 개인별 맞춤형 의료가 가능해졌다. 이는 바꾸어 말하면 개개인의 질병을 예측할 수 있게 되는 것이고 이를 예방하기 위해서는 맞춤형 의료와 함께 맞춤형 영양에 대한 컨설팅이 필요하다. 이에 영양관리를 위한 개별맞춤형 3D-프린팅 제품에 대한 수요가 창출될 것이고, 3D-프린팅 영양컨설팅 프로그램 개발이 필요할 것이다. 식품 제조와 유통 분야에서 신성장 미래형 산업으로 급속한 발전에 의한 새로운 시장 창출과 국내 경제의 활성화와 함께 21세기형 식품소비자의 소비 성향에 부응함으로써 식품 관련 신문화 창출과 연관 산업의 발전이 예상된다. 나아가 소비자 주도형 3D-식품제조 플랫폼에 의한 미래 유망산업의 다른 한 분야인, ‘집단지성(crowdsourcing)’에 의한 ‘집단생산(peer production)’ 방식의 적용에 의한 새로운 시장이 형성될 수 있을 것이다.

References

- Adhikari B, Howes T, Bhandari BR, Truong, V. 2000. Experimental studies and kinetics of single drop drying and their relevance in drying of sugar-rich foods: a review. *Int. J. Food Prop.* 3: 323-351.
- Bhandari BR, Datta N, Howes T. 1997. Problems associated with spray drying of sugar-rich foods. *Dry. Technol.* 15: 671-684.
- Bhandari BR, Howes T. 1999. Implication of glass transition for the drying and stability of dried foods. *J. Food Eng.* 40: 71-79.
- Bhandari BR, Roose YH. 2003. Dissolution of sucrose crystals in the anhydrous sorbitol melt. *Carbohydr. Res.* 338: 361-367.
- Brick J. Hershey offers personal 3D printing of chocolate treats. Available from: <http://www.psfk.com/2015/01/cocojet-custom-print-hershey.html>. Accessed Oct. 15, 2016.
- Campanella OH, Peleg, M. 1987. Determination of the yield stress of semi-liquid foods from squeezing data. *J. Food Sci.* 52: 214-217.
- Charm S.E. 1962. Determination of shear stress rate behavior in foods in the presence of a yield stress. *J. Food Sci.* 28: 107-113.
- Chawla NV, Davis DA. 2013. Bringing big data to personalized healthcare: a patient-centered framework. *J. Gen. Int. Med.* 28: 660-665.
- De Kee D, Turcotte G, Fildey K. 1980. New method for the determination of yield stress. *J. Texture Stud.* 10: 281-288.
- Diaz JV, Noort MWJ, Van BKJC. 2015. Method for the production of an edible object by powder bed (3d) printing and food products obtainable therewith. PCTWO201515897A1.
- Fli, Liu GY, Wang YH, Zhang X, Zhao X, Gao ZY. 2015. Food 3D printing prototyping apparatus comprises storage tank connected to extruded material unit, where bottom of storage tank is connected to buffer tank via conveying pipe, and buffer tank is placed on heating or cooling unit. China patent NO. 201520233891U.
- Glicksman M. 1982. Functional properties of hydrocolloids. In: *Food Hydrocolloids vol. I*, M. Glicksmaneds, CRC Press, New York, pp. 50-57.
- Goncalves EV, da Silva Lannes SC. 2010. Chocolate rheology. *Cienc. Technol. Aliment.* 30: 845-851.
- Grood JPW, Grood PJ, Tillie LWM. 2013. Method and device for dispensing a liquid. US patent NO. 20110121016A1.
- Hao L, Mellor S, Seaman O, Henderson J, Sewell N, Sloan M. 2010. Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing. *Virt. Phys. Prototyp.* 5: 57-64.
- Haque MK, Roose YH. 2006. Differences in the physical state and thermal behavior of spray-dried and freeze-dried lactose and lactose/protein mixtures. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* 7: 62-73.
- Hull CW. 1986. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US patent NO. 4575330.
- Kim HJ. 2014. Liquid material cartridge for three-dimensional printer used in e.g. food industry, has extruding device moved forward and backward and top and bottom by Y-axis motor and Z-axis drive motor arranged in frame lower portion respectively. Korea patent NO. 201415725A.
- Lipton J, Arnold D, Nigl F, Lopez N, Lipson H. 2010. Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional structure suitable for conventional post-processing. In: 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-an Additive Manufacturing Conference. August 9-11, Austin, TX, USA, pp. 809-815.
- Luisel R, Huang S, Mao Q, Xu T, Zhang J, Chen S, Guo J, Emilio S, VICTOR D, XAVIER O. 2014. Additive manufacturing printer system for printing e.g. food product, has processor

- that provides controller with position coordinates for movement of tool, instructions for exchange of capsule holders, and adjustment of heating device. China patent NO. 201480038848A.
- Malone E, Lipson H. 2007. Fab@Home: the personal desktop fabricator kit. *Rapid Prototyp. J.* 13: 245-255.
- Michail N. 2013. Biozoon's 3D printed smooth foods target Europe's elderly. Available from: <http://www.foodnavigator.com/Market-Trends/Biozoon-s-3D-printed-smooth-foods-target-Europe-s-elderly>. Accessed Oct. 15, 2016.
- Missaire F, Qiu C-G, Rao MA. 1990. Yield stress of structured and unstructured food suspensions. *J. Texture Stud.* 21: 479-490.
- Norman J, Madurawe RD, Moore CM, Khan M. A, Khairuz-zaman A. 2017. A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D-printed drug products. *Adv. Drug Del. Rev.* 108: 39-50.
- OfoliRY, Steffe JF. 1992. Some observations on the use of slit rheometry for characterizing the primary normal stress difference of extrudates. *J. Food Eng.* 18: 145-157.
- Open NASA. 2016. 3D food printer in space. Available from: <http://www.open.nasa.gov/innovation-space/3d-food-printer-in-space/3Dfood printer in space>. Accessed Oct. 15, 2016.
- Roose YH. 2010. Glass transition temperature and its relevance in food processing. *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 1: 469-496.
- Shirazi SFS, Gharekhani S, Mehrali M, Yarmand H, Metselaar, HSC.Adibkadi, N, Osman NAA. 2015. A review on powder-based additive manufacturing for tissue engineering: Selective laser sintering and inkjet 3D printing. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 16: 033502.
- Slade L, Levine H. 1994. Water and glass transition-dependence of the glass transition on composition and chemical structure : special implication for flour functionality in cookie baking. *J. Food Eng.* 22: 143-188.
- Sun J, Zhou W, Huang D, Fuh JY, Hong GS. 2015. An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food Bioprocess Technol.* 8: 1605-1615.
- Wei HH, Xu SR, Wei JY, Wei TH. 2015. Edible 3D print material, comprises main material and auxiliary material, where main material comprises starch, water, free sugar, pentosan and protein and auxiliary material comprises methyl cellulose, enzyme and cyclic oligosaccharides. China patent NO. 2015278915A.
- Yang J, Wu L, Liu J. 2001. Rapid prototyping and fabrication method for 3-D food objects, US Patent, NO. 6280785.
- Yang F, Zhang M, Bhandari B. 2015. Recent development in 3D food printing. *Crit. Rev. Food Sci. Nut.* Published online 19 Oct 2015.
- Yoo B, Rao MA, Steff JF. 1995. Yield stress of food dispersions with the vane method at controlled shear rate and shear stress. *J. Texture Stud.* 26: 1-10.
- Zoran A, Coelho M. 2011. Cornucopia: the concept of digital gastronomy. *Leonardo* 44: 425-431.