

RESEARCH ARTICLE

3D 프린팅 인공육 개발

이주오¹, 안태영², 최경식², 선우훈^{2*}

¹순천대학교 동물과학기술학과, ²순천대학교 농업기계공학과

Development of 3D Printing Technique for Artificial Meat

Juo Lee¹, Tayoung An², Keongsik Cho², Hoon Seonwoo^{2*}

¹Department of Animal Science and Technology, Suncheon National University, Suncheon, Korea

²Department of Agricultural Machinery Engineering, Suncheon National University, Suncheon, Korea

*Corresponding Author: uhun906@scnu.ac.kr

Abstract

The consumption of meat is increasing as the population increases. As a result, livestock feeding and slaughtering is growing, creating many problems including global warming, water shortage, and unethical behaviors. On the other hand, the high cost of fresh meat results in starvation. To essentially solve this problem, research on artificial meat made by reused meat is needed. The artificial meat can solve unethical behavior and environmental pollution. In this study, we developed a three dimensional (3D) printer, which produces artificial meat, and use it to artificial meat printing techniques. First, the 3D printer was assembled and modified. Syringe pumps and nozzles required for 3D meat printing were modelled and printed by 3D printer. The ingredients of 3D meat printing were made by grinding pork and chicken with water at 1:1 ratio through blender and strainer. Their printability showed limitation as the height of 3D printed meat increased. This study showed the possibility of customized meat with 3D printing and expected the engineered meat that can be processed into desired ingredients in the future.

Keywords: Artificial Meat, 3D printing, Food processing

Introduction

현재 우리나라의 최근 10년간 소, 닭, 돼지 도축 현황은 매년 증가하고 있으며 앞으로도 더 증가할 추세이다. 그러나 도축 과정에 있어서 동물들의 각종 질병으로 인한 가격의 불안정 그리고 도축과정 속에서 일어나는 비윤리적인 행위와 환경오염에 관한 문제점들이 야기되고 있다. 현재 고기가 판매되는 과정 속에서 국내 1년 기준으로 물 사용량은 7,110L, 땅 면적 1,309,787 ha, 온실가스는 460만 t의 CO₂를 배출하고 있어서 환경오염에 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 문제들로 인하여 전통적인 육류 산업은 변화를 직면하고 있다. 전통적인 육류 산업의 문제점을 해결할 새로운 방안으로 인



OPEN ACCESS

DOI: <https://doi.org/10.12972/jame.20210005>

Received: December 25, 2021

Revised: December 27, 2021

Accepted: December 28, 2021

Copyright: © 2021 Journal of Agricultural Machinery Engineering



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.

조육과 배양육이 떠오르고 있다. 인조육이란, 고기가 아닌 재료를 이용하여 고기와 비슷한 맛이나 식감을 내게 하는 고기를 뜻하며, 특히 콩이나 밀의 단백질 또는 석유 등으로 특수한 효모를 배양하여 그것에서 추출한 단백질 등을 원료로 하여 만들어 지고 있는 것들을 일컫는다. 배양육은 가축의 세포를 세포공학기술로 배양하여 만들어진 고기이다. 이러한 기술은 가축의 사육과정을 거치지 않기 때문에 사육환경에서 발생하는 환경문제나 가축의 질병 및 도축장에서 발생하는 윤리적인 문제에서 자유로울 수 있고, 생산과정에서 배지나 배양조건등을 조절하여 인간의 건강에 더 유익한 고기를 생산할 수 있다(MoonHee Choi and Shin HyunJae 2019). 배양육은 일반적으로 근육세포를 증식시키고 이를 스키펴드 등에 부착시켜 성장 배지가 있는 생물반응기로 옮기는 방식으로 생산이 진행된다. 그러나 이러한 방식으로 실험실에서 배양되는 인공육은 실제 근육의 필라멘트 섬유구조의 형태로 배양하기 어렵기 때문에 고기의 맛과 식감을 재현해 내기가 어렵다(Gaydhane et al. 2018).

최근에 소비자 맞춤형 육류 제품의 제조를 위하여 3D 프린팅기술을 이용하고자 하는 많은 시도들이 문헌에 발표되었다. 3D 프린팅이란 3차원의 입체형상을 구현하기 위해 컴퓨터 지원설계(CAD) 도면을 바탕으로 특정재료를 한층 씩 얇게 적층하여 가공하는 기술을 의미한다. 특히 압출기반의 3D 프린팅 방식은 광범위한 점도의 잉크를 사용할 수 있으며 구조체의 모양이나, 다공성 및 세포분포등을 조절할 수 있기 때문에 최근 몇 년 동안 바이오 프린팅으로 널리 사용되어 왔다(Placone and Engler 2018). 이러한 방식의 3D 프린팅기술을 이용하여 근육세포, 지방세포 및 세포 외 기질을 포함하는 스키펴드를 인쇄함으로써 기존의 고기만 배양하는 기술보다 정교하게 고기의 구조를 모방하는 연구들이 진행되었다(Sun, Zhou, and Huang 2018). 3D 프린팅의 방식 중 식재료를 녹이거나 갈아서 3D 프린팅용 잉크로 만들어 다시 원하는 모양으로 출력하거나 새로운 식감을 만드는 기술을 3D food printing (3FP)라고 한다. 3FP는 음식의 성분이 건강에 미치는 영향과 고기조직의 선호도가 개인마다 다르기 때문에 음식을 개인 맞춤형하여 제조하는 것을 목적으로 한다(Hao et al, 2010). 육류제품 같은 경우 근육조직과 지방조직 그리고 가축의 혈액을 설계된 형태로 인쇄하여 소비자가 원하는 고기의 조직에 맞춰서 인쇄함으로써 육류제품의 유연성을 제공하고자 하는 연구가 진행되고 있다(Ben-Arye and Levenberg 2019; Bhat et al 2015b). 본 연구에서는 3FP방식의 3D 프린팅 기술을 이용하여 고기의 질감이나 영양성분 등을 맞춤화 하기 위한 전 단계로써 돼지 고기나 닭고기 등을 이용하여 3D 프린팅용 잉크로 개발하여 3D 프린팅의 적합성과 배양육의 가능성 여부 등을 확인하고자 한다.

Materials and Methods

3D 프린터 제작

인공육을 압출하는 용도로 3D food printer를 개조하기 위하여 Fuse deposition modeling (FDM) 방식의 3D printing 기법을 이용하여 시린지 펌프와 직접 디자인한 노즐 홀더를 출력하였다. 출력된 시린지 펌프와 노즐 홀더는 기존의 FDM방식의 노즐을 분리한 후 장착되었으며, 그 후 50 mL용량의 syringe를 장착하여 Extruder기반의 3D 프린터를 제작하였다(Fig. 1). 이후 오픈소스 소프트웨어인 Repetier host를 이용하여 펌웨어를 업로드하였다. 고기의 여러가지 식감을 이용하기위해 노즐의 개수를 2개로 설정하였으며 히팅베드 시스템과 압출량, 프린팅 속도 등을 설정하였다(Table 1).

Table 1. 3D printing parameter settings.

Printing conditions	Set value
print speed	15~25 mm/s
bed temperature	50~75°C
Nozzle diameter	0.4 mm
Layer height	0.2 mm

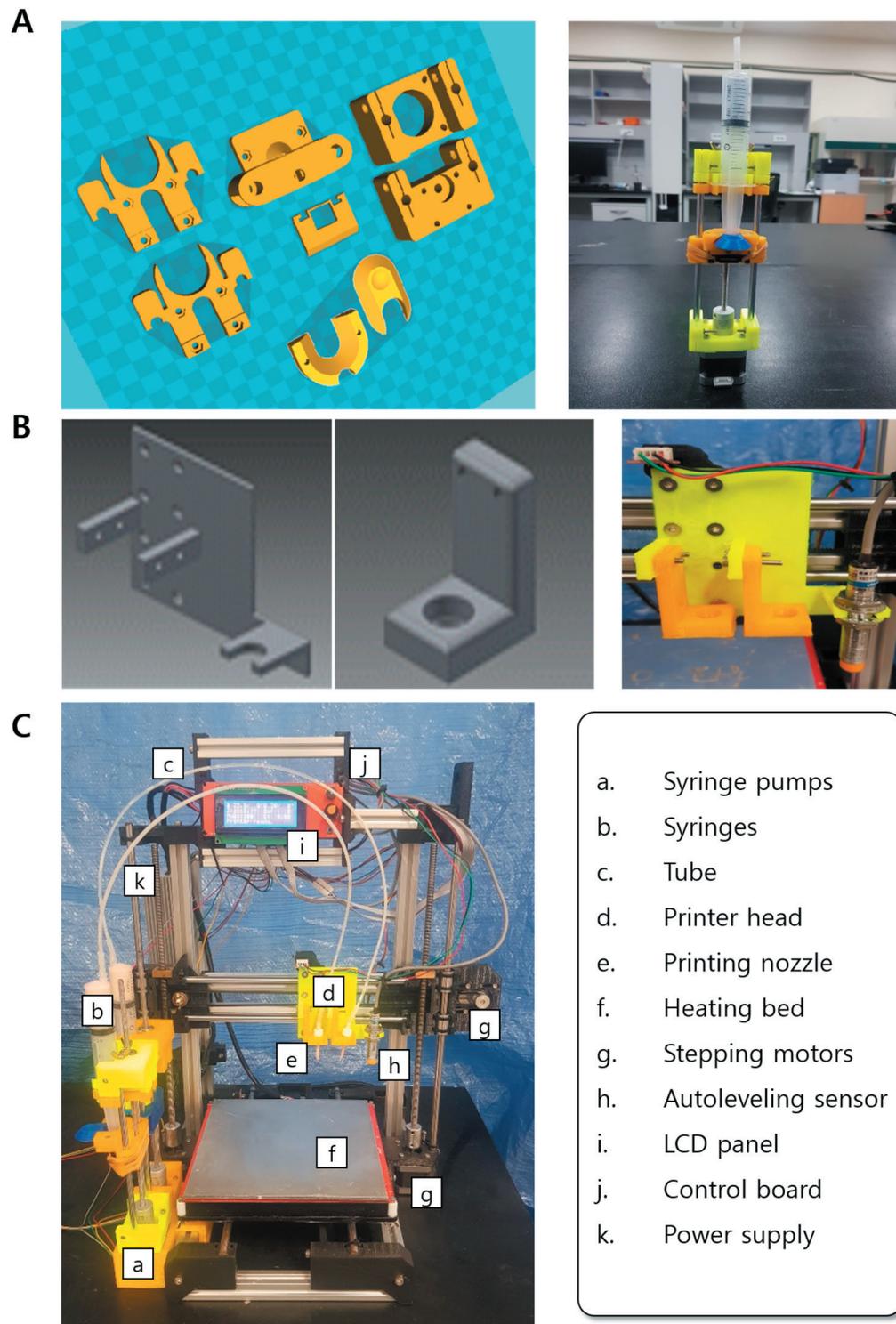


Fig. 1. 3D printer assembly. (A) Preparation of 3D printer components. Components of syringe pumps were printed and assembled. (B) Printer head modeling and assembly. The components of printer head were modeled and printed. (C) Dual nozzles and auto leveling sensors were considered. The prepared printer head, nozzles and syringe pumps were applied to the 3D printer to enable 3D meat printing.

3D 프린팅용 육류기반의 잉크 제조과정

프린팅용 잉크의 재료로 사용하기 위해 믹서기(Cozyymoa, Korea)를 이용하여 돼지고기와 닭고기를 18,000 RPM으로 분쇄한 후에 균질기를 통해 또한 추가적으로 균질기를 통하여 부피가 큰 부분을 걸러내고 고기를 추가적으로 분쇄하였다. 충분히 균질화시킨 돼지고기와 닭고기는 물과 1:1, 6:4, 7:3의 무게 비율로 혼합하여 3D프린팅용 잉크로 제조되었다. 이후 프린팅 적합성 등을 파악하기 위하여 각 혼합비율로 제조된 잉크들의 점도측정(DV1MLV, Brookfield, USA)이 25°C의 온도에서 로터속도 60 RPM의 조건으로 수행되었다(Fig. 2).

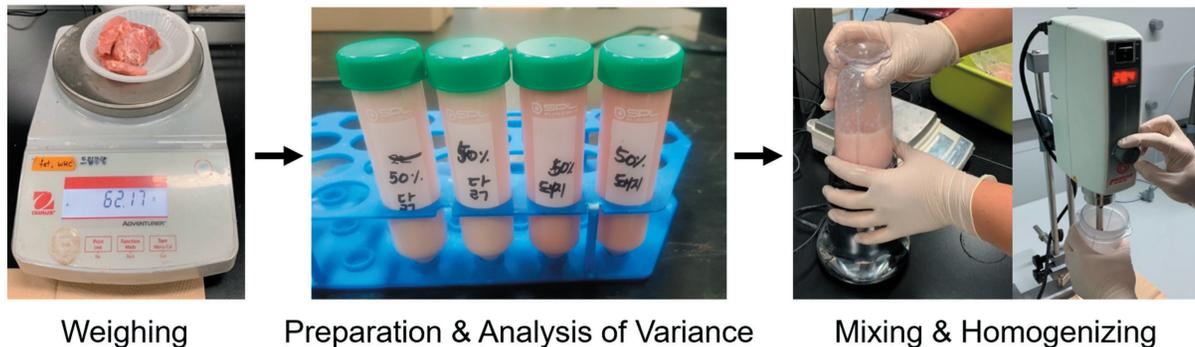


Fig. 2. Preparation of 3D printing meat inks. Water and meats were mixed 1:1 ratio and homogenized.

인조육 출력

3D 프린팅용 육류기반 잉크를 제조한 후, 3D 프린팅용 육류기반의 잉크를 syringe에 넣은 후 압출방식의 3D 프린터에 장착하여 인쇄능 등을 평가하였다. 인쇄 정확도를 평가하기 위하여 한면의 길이가 10 mm인 정육면체를 인벤터를 통하여 모델링한 후, stl파일로 변환하여 slicing 프로그램을 통하여 G-code로 변환하였다. 프린팅 조건은 인쇄속도 15~25 mm/s, 노즐 직경 0.4 mm, 한층의 레이어 높이는 0.2 mm, 베드온도는 층이 올라갈수록 적층레이어에 열 전달이 되지 않아 점점 온도를 올리는 식으로 출력하였다(Table 1). 이후 출력된 정육면체를 버니어 캘리퍼스를 가지고 각 면의 길이를 측정하여 설계된 값과 실제 값을 비교하였다.

바이오 프린팅

향후 배양육을 3D 프린팅함에 있어, 세포가 노즐을 통과할 때 전단력으로 인하여 사멸할 수도 있기 때문에 프린팅 직후 세포의 생존여부를 확인하였다(Liu, Ho and Wang, 2018). 세포는 암세포 중 하나인 HeLa (Korea Cell Line Bank, Seoul, Korea)를 이용하였으며 5×10^6 cells/mL의 농도로 시딩하여 시린지에 넣은 후 압출하였다. 이후 바이오 프린팅된 구조체를 Live/Dead assay Kit (L3224, Invitrogen, USA)를 이용하여 생존성 등을 평가하였다.

통계분석

통계분석을 위하여 분산분석을 수행하였고 사후 검증은 Duncan's multiple range test를 이용하여 유의적 차이($p < 0.05$)를 검증하였다. 모든 양적 데이터는 평균 ±표준오차로 표시되었다.

Results and Discussion

고기기반 잉크의 점도특성

3D 프린팅용 잉크는 적층가공이 가능해야 하기 때문에 적절한 점도가 있어야 한다. 점도가 너무 낮을 경우 적층이 불가능하며, 옆으로 퍼지는 현상이 발생할 수 있다(Panda et al). 반면 점도가 높을 경우 노즐에서 잉크가 압출되지 못하고 노즐 막힘 현상이 발생하는 문제가 생길 수 있다. 따라서 3D 프린팅용 잉크의 핵심 특성 중 하나인 점도를 측정하기 위하여 각 혼합 비율별로 만들어진 고기 기반의 잉크의 점도를 측정하였다(Fig. 3). 결과적으로 고기의 비율이 높아질수록 점도가 올라가는 특성을 보였는데 고기와 물이 7:3 및 6:4로 섞인 그룹은 압출불량의 현상을 보였으며, 1:1로 섞인 잉크에서는 적층가공이 가능하면서 압출이 원활히 되는 특성을 보였다(Fig. 4).

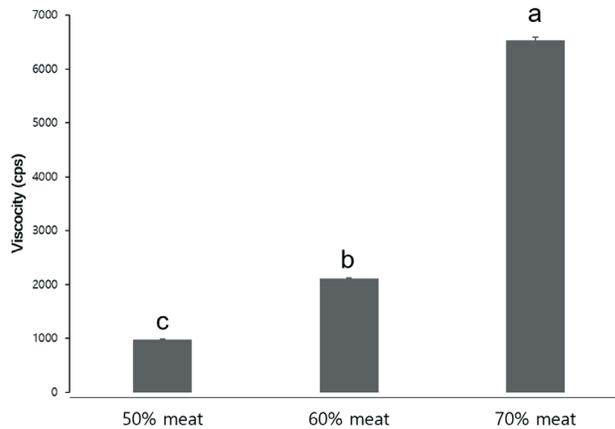


Fig. 3. Viscosity measurement results of meat-based inks (ANOVA, Duncan's multiple range test, $p < 0.05$). Errorbars mean standard errors.

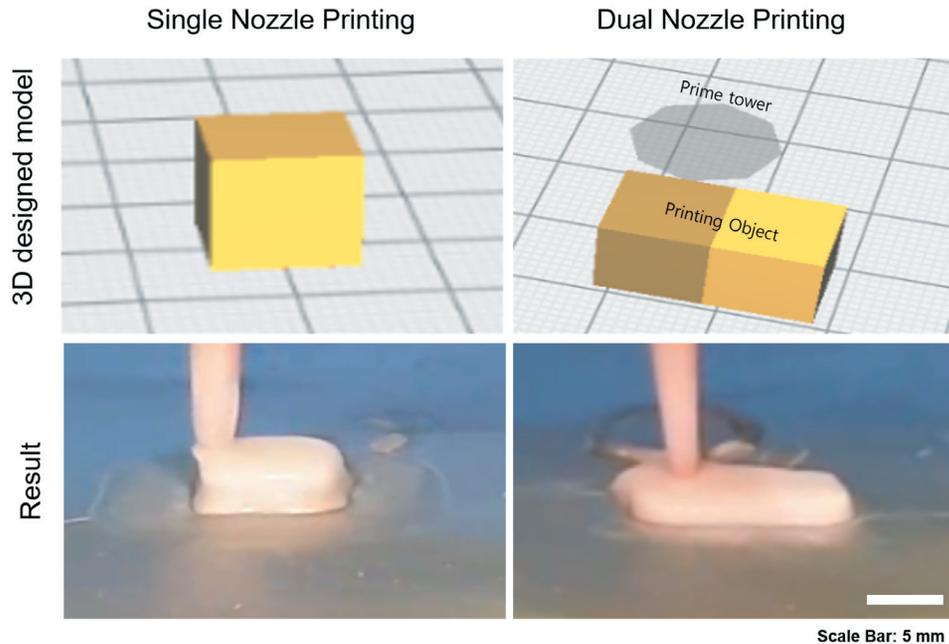


Fig. 4. 3D printing of meat-based inks (1:1 ratio). To test single and double nozzle printers, a cube shape was 3D designed, converted to stl file, and then 3D printed.

프린팅 정확도 측정

개발된 고기 기반의 3D 프린팅용 잉크의 프린팅 정확도를 측정하기 위하여 정육면체 모양을 출력한 후 폭과 높이를 측정하였다(Fig. 5). 초기레이어의 경우 가로와 세로의 길이는 설계된 치수와 일치하였으나 층이 올라갈수록 길이가 줄어들며, 가운데로 뭉치는 현상을 보였다. 이는 표면장력으로 인해 잉크들이 가운데로 모이면서 나타나는 현상으로 사료된다. 또한 출력된 높이는 설계된 높이보다 낮게 출력이 되었으며 이는 잉크의 물이 증발하면서 나타나는 현상으로 보인다. 이러한 문제는 프린팅 레이어 높이를 낮추거나, 혹은 물을 대신할 수 있는 적절한 점도가 있으면서도 휘발성이 낮은 물질을 혼합하는 방식으로 해결할 수 있다.

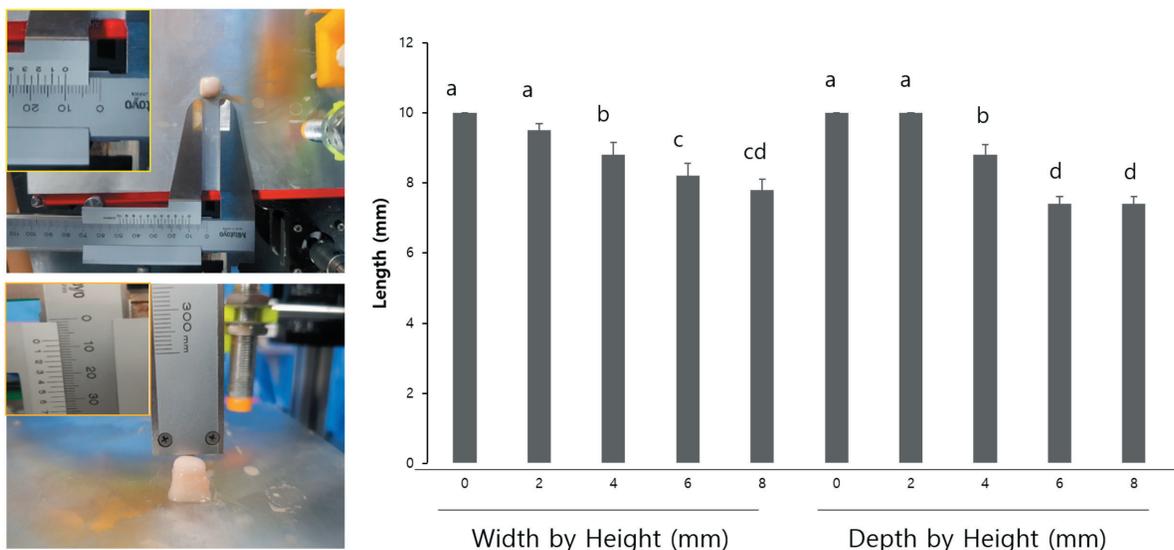


Fig. 5. Printing Accuracy Test. The length of the width, depth, and height were measured using a vernier caliper, and then the quantitative analysis was performed (ANOVA, Duncan's multiple range test, $p < 0.05$). Errorbars mean standard errors. Although accurate values were measured up to 4 mm in height, errors began to occur more than 4 mm.

세포 생존성 확인

본 연구의 최종목표 단계인 가축의 지방 및 근육세포를 프린팅 한 후 배양육을 개발하기에 앞서 세포가 프린팅 될 때 전 단층력으로 인하여 손상을 받을 수 있기 때문에 프린팅 후 생존성 여부를 확인하였다(Fig 6). 사용된 HeLa 세포는 압출된 직후 죽지 않고 대부분 살아있는 것을 확인하였으며, 이를 통해 가축의 근육 및 지방세포 또한 이와 마찬가지로 프린팅 후에 살아 있을 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다. 더불어 가축의 근육세포와 지방세포를 프린팅 함에 있어 세포가 자랄 수 있는 미세환경을 조성해줌과 동시에 어떻게 배양육으로 배양을 할 것인지에 대한 논의가 필요하다.

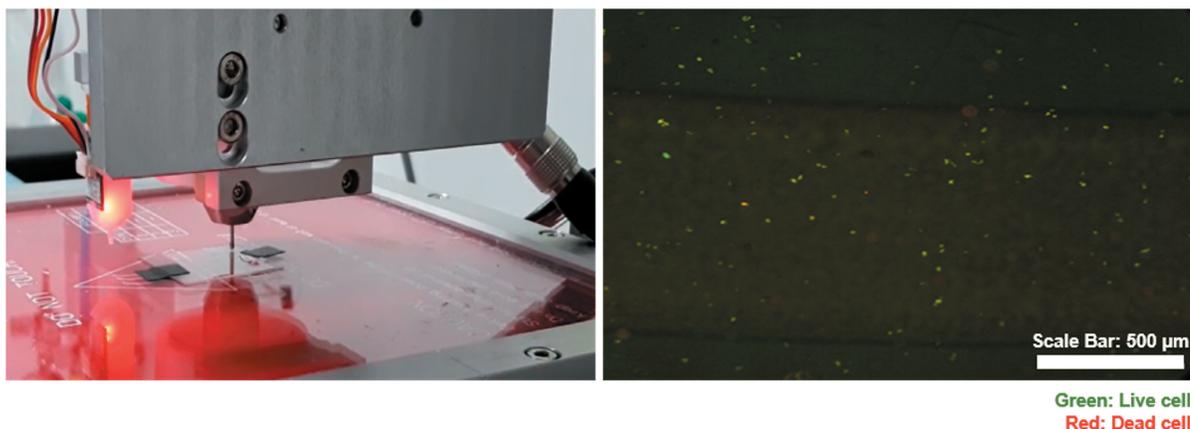


Fig. 6. Live and Dead assay after 3D cell printing

Conclusion

본 연구에서는 소비자 맞춤형 인공육을 개발하기에 앞서 기초단계로써 압출기반의 3D 프린터를 제작하였으며, 돼지고기와 닭고기를 이용하여 제작된 3D 프린터에서 실제로 인쇄가 가능한 고기 기반의 3D 프린팅용 잉크를 개발하였다. 점도 측정결과 각 비율로 혼합된 잉크에서 고기가 50% 함유된 잉크가 적층가공이 가능하고 노즐막힘 현상을 방지할 수 있다는 것을 확인하였으며, 이를 토대로 인쇄를 해본 결과 초기 레이어에서는 정확한 인쇄능을 보였지만 적층높이가 올라갈수록 표면장력과 물의 증발로 인하여 인쇄능이 저하되는 것을 확인하였다. 향후 본 연구를 기반으로 인조육과 배양육을 개발하면 인류의 지속가능한 발전에 한 층 다가갈 수 있을 것으로 보인다.

Acknowledgements

이 논문은 2021년 순천대학교 학술연구비 공모과제로 연구되었음.

References

- Ben-Arye, T., and S. Levenberg. 2019. Tissue engineering for clean meat production. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3: 1-19.
- Ben-Arye, T., Y. Shandalov, S. Ben-Shaul, S. Landau, Y. Zagury, I. Ianovici, N. Lavon, and S. Levenberg. 2020. Textured soy protein scaffolds enable the generation of three-dimensional bovine skeletal muscle tissue for cell-based meat. *Nature Food* 1 (4):210–20.
- C. Liu, C. Ho, J. Wang The development of 3D food printer for printing fibrous meat materials IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 284 (1) (2018), Article 012019
- Gaydhane, M.K., U. Mahanta, C.S. Sharma, M. Khandelwal, and S. Ramakrishna. 2018. Cultured meat: State of the art and future. *Biomanufacturing Reviews*
- J. Lipton, D. Arnold, F. Nigl, N. Lopez, D. Cohen, N. Norén, H. Lipson, Multi-material food printing with complex internal structure suitable for conventional post-processing Paper presented at the annual international solid freeform fabrication symposium, Austin, Texas (2010)

- L. Hao, S. Mellor, O. Seaman, J. Henderson, N. Sewell, M. Sloan , Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing *Virtual and Physical Prototyping*, 5 (2) (2010), pp. 57-64
- MoonHee, Choi, and Shin HyunJae. "State-of-the-art of cultured meat research and engineering task." *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal* 34.3 (2019): 127-134
- Panda, Biranchi, Cise Unluer, and Ming Jen Tan. "Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing." *Cement and Concrete Composites* 94 (2018): 307-314.
- Placone, J. K., and A. J. Engler. 2018. Recent advances in extrusion-based 3D printing for biomedical applications. *Advanced Healthcare Materials* 7 (8):e1701161.
- Sun, J., W. Zhou, L. Yan, D. Huang, and L-y. Lin. 2018. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control. *Journal of Food Engineering* 220:1-11
- T.F. Wegrzyn, M. Golding, R.H. Archer , Food layered manufacture: A new process for constructing solid foods *Trends in Food Science & Technology*, 27 (2) (2012), pp. 66-72