

초콜릿 소재의 3차원 프린터 개발에 관한 연구

A Study on Development of Three-Dimensional Chocolate Printer

김규언¹, 박 근², 이치범^{2,#}
Kyu Eon Kim¹, Keun Park², and Chibum Lee^{2,#}

¹ 서울과학기술대학교 대학원 기계설계로봇공학과 (Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology)

² 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: chibum@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6337, FAX: +82-2-974-8270

KEYWORDS: Chocolate (초콜릿), 3D Printing (3차원 프린팅), Chocolate printer (초콜릿프린터), Design of experiment (실험계획법)

In this study, we developed a 3D chocolate printer and studied the conditions needed for chocolate printing. Because chocolate is a mixture of cocoa mass, cocoa butter and sugar particles, its properties vary with temperature, and care is required in melting and extrusion. A chocolate supply unit is composed of a heating block and a syringe pump. It is integrated with a 3-axis linear robot. In order to be more accurate than the existing 3D chocolate printer is, the system was configured so that the printing line width became 430 μm . Printing performance was studied according to various parameters. The condition needed for printing lines with a stable width was discovered by the experimental design method and has been confirmed by a 2D line test. These 3D printing experiments showed that it was possible to build a 3D shape with an inclination angle of up to 45° without support. Further, chocolate printing of a 3D shape has been successfully verified with the developed system.

Manuscript received: October 10, 2016 / Revised: December 1, 2016 / Accepted: January 18, 2017

1. 서론

3차원 프린팅(3D Printing)은 단면을 적층하여 입체 형상을 제작하는 공정으로 과거에는 쾌속 조형(Rapid Prototyping)이라는 명칭으로 불렸으나, 최근 적용분야가 시작(Prototyping)에서 벗어나 다양한 용도의 제품 제작에 활용되고 있다.¹⁻³ 3차원 프린팅은 다품종 소량생산에 적합한 기술로 소비자의 다양한 요구를 반영할 수 있으며, 개인맞춤형 제품 혹은 소량 생산의 경우 기존의 생산방식보다 적은 비용으로 제작이 가능한 장점이 있다.⁴ 또한 기존의 플라스틱 소재에서 탈피하여 금속,⁵ 세라믹,⁶ 생체재료⁷ 등의 다양한 소재에 적용됨으로써 적용 범위를 넓혀가고 있다.

최근에는 식재료를 사용하여 설탕, 초콜릿, 쿠키, 케익, 피자 등의 음식물을 3차원 형상으로 제작하기 위한 프린터가 개발되고 있으며,⁸ 특히 선물, 이벤트 등의 목적으로 많이 사용되는 초콜릿의 경우 정형화되지 않은 독특한 형상으로 제작하기 위한 목적으로 3차원 프린팅에 적용되고 있다.⁹ 초콜릿 재료의 프린팅을 위해서는 일반적으로 재료압출형(Material Extrusion, ME) 방식과 재

료 분사형(Material Jetting, MJ) 방식이 사용되는데, 초콜릿 소재가 반응용 상태에서 적층되는 재료압출형 방식의 경우 초콜릿 재료의 유변학적 물성에 대한 이해가 필요하다.¹⁰

초콜릿 재료는 코코아 매스(Cocoa Mass), 코코아 버터(Cocoa Butter)를 주성분으로 하여 당유, 유지, 유기공품 등의 성분이 함유된다.¹¹ 초콜릿 제조시 통상적으로 상기 재료를 배합한 후 적정 온도로 가열하여 용융시킨 후 교반하며 서냉시키는 템퍼링(Tempering) 과정을 거치게 되는데, 템퍼링 조건에 따라 초콜릿의 광택, 점도 등의 물성에 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.¹²⁻¹³ 따라서 재료압출형 방식을 사용한 초콜릿 프린팅을 위해서는 템퍼링 조건에 따른 재료의 출력조건을 고찰해야 한다.

본 연구에서는 재료압출형 방식의 초콜릿 프린터를 개발하기 위해 3축 구동방식의 장비를 구축하였고, 주사기 펌프(Syringe Pump) 방식을 사용하여 초콜릿 소재를 공급할 수 있도록 하였다. 또한 다양한 출력조건(압출속도, 이송속도, 적층높이 등)에 따른 출력 성능을 고찰하고, 안정적인 선폭으로 출력이 가능한 출력조건을 결정하였다. 또한 개발된 시스템을 사용하여 3차원

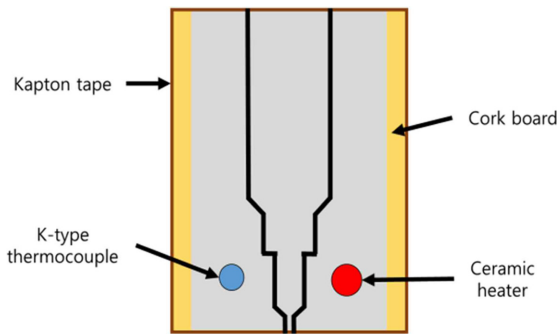


Fig. 1 Heating block for chocolate melting

입체형상의 제작 기능을 성공적으로 구현하였다.

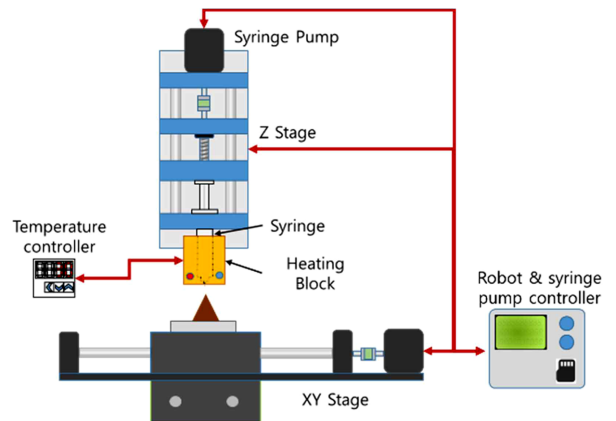


Fig. 2 Schematic of 3D chocolate printer

2. 초콜릿 3차원 프린터 설계 및 개발

2.1 소재 공급부의 구성

초콜릿은 온도에 따라 유변 물성이 크게 변화한다. 따라서 온도를 일정하게 유지하여야 초콜릿을 균일하게 프린팅할 수 있다. 온도 변화가 클 경우, 초콜릿이 변성될 수 있으므로 최대한 온도 변화가 작도록 유지하여야 한다.

본 연구에서는 위생적으로 초콜릿을 공급하기 위하여, 10 mL 의료용 주사기가 직접 장착될 수 있도록 소재 공급부를 제작하였다. 열전달이 잘 이루어지도록 알루미늄 AA6061을 이용하여 Fig. 1과 같이 히팅 블록(Heating Block)을 가공하였으며, 10 mL 루어락 주사기, 세라믹 카트리지 히터(Ceramic Cartridge Heater, 12 V/40 W, Reprap, USA)와 K타입 열전대(K-Type Thermocouple)의 조립 공차를 최소화하고, 디스펜싱 노즐(Dispensing Nozzle)의 끝단이 5 mm 노출되도록 하였다. 발열체에 고르게 열이 분포하도록, 캡톤(Kapton) 테이프와 8 mm 코르크 보드(Cork Board)를 사용하여 단열하였다. 온도제어부는 별도로 구성하였으며, 정밀한 온도조절을 위하여 PID 제어가 가능한 온도 제어기(TC4S-14R, Autronics Co., Korea)를 이용하였다.

초기에는 공압 압출(Pneumatic Extrusion)을 시도하였으나, 초콜릿의 점소성(Visco-Plastic) 특성으로 인하여, 균일한 출력이 불가능하였다. 주사기 펌프는 초콜릿에 충분한 추력을 부여할 수 있도록 직경 8 mm, 리드 2 mm/rev인 볼스크류(BNK 0802-3RRG0 + 185LC3Y, THK Co., Japan)를 사용하였으며, 3개의 볼부쉬(Ball Bush) 가이드를 설치하여 기구의 안정성을 높였다.¹⁴ 구동을 위하여 피드백 제어를 내장한 42각 스텝모터(Ezi-SERVO-MI-42M-A, Fastech Co., Korea)를 이용하였고, 분해능을 10,000 pulse/rev으로 설정하여 정밀한 운동이 가능하도록 하였다.

2.2 초콜릿 프린터 장비 구성

Fig. 2는 3축 직교 로봇과 주사기 펌프를 이용하여 구성한 초콜릿 프린터의 구성도를 보여준다. 3축 직교 로봇은 리드 2 mm/rev, 정확도 0.05 mm인 리니어 스테이지(FS-X-LB140, Science Town Inc., Korea)을 이용하여 구성하고, 구동을 위하여 펌프와 동일한

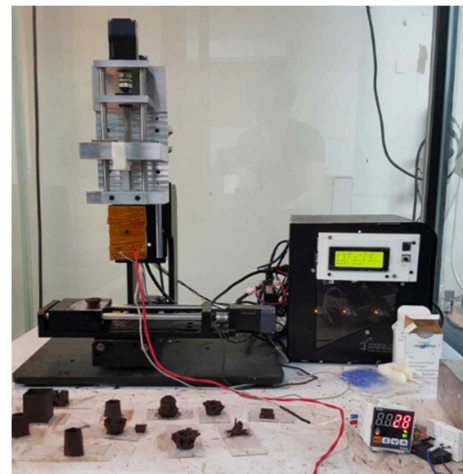


Fig. 3 3D chocolate printer

스텝모터(Ezi-SERVO-MI-42M-A, Fastech co., Korea)를 이용하였고, 분해능은 1,000 pulse/rev으로 설정하였다.

3차원 초콜릿 프린터를 제어하기 위하여 주제어기로 Arduino Mega (Arduino, Italy)를 이용하였으며, 펌웨어(Firmware)는 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식의 3차원 프린터에 널리 사용되는 오픈소스인 Marlin을 기반으로 3차원 초콜릿 프린터에 적합하도록 수정하였다.¹⁵ Marlin은 3차원 프린팅에 필요한 G 코드와 E 코드가 구현되어 있으며, 수정이 용이하다. 사용자의 편의성을 살리기 위해 액정 디스플레이(Smart LCD Controller, Reprap, USA)를 이용하여 현재 상태를 표시해주고, 모터리 엔코더 스위치를 이용하여 메뉴를 선택할 수 있도록 하였다. 또한, 메모리카드로 G 코드를 읽을 수 있게 하여 컴퓨터와 통신할 필요 없이 데이터를 보낼 수 있도록 하였다. Fig. 3은 개발한 3차원 초콜릿 프린터를 보여준다.

3. 초콜릿 3차원 프린팅

3.1 초콜릿의 유변학적 특성

초콜릿 재료의 주성분인 코코아 버터는 다수개의 결정화 지점

Table 1 The polymorphic forms of cocoa butter¹³

Form	Crystallization	Melting range	Stability
γ	> 16.9°C	up to 16.9°C	Unstable
α	From γ	up to 23.8°C	Unstable
β_1	16.9 - 22.5°C	15 - 29.4°C	Semi-Stable
β	22.5 - 33.6°C	20 - 35.0°C	Stable

(Crystallization Points)을 내포하고 있으며, 이러한 다형성 결정화 특성(Polymorphic Form)은 Table 1과 같이 요약된다. 이중 β 결정 상태가 가장 안정적인 상태로 알려져 있으며,¹³ 본 연구에서는 β 결정 상태를 유지하기 위한 온도 조건을 유지하기 위한 용융 조건 및 템퍼링 조건을 설정하였다.

초콜릿 재료 내부에서 부분적으로 결정화가 이루어지면 다른 결정을 이룬 영역과 섞이지 못하게 되고, 고형시 재료의 구성이 불균일하게 되며,¹² 프린팅시 불균일하게 혼합된 재료가 그대로 용융되면서 디스펜싱 노즐에 멍치는 현상이 발생하게 된다. 따라서 초콜릿을 안정적으로 프린팅하기 위해서는 미리 템퍼링(Tempering)을 시행하여 구성 성분을 골고루 혼합하는 과정이 필요하다. 템퍼링은 카카오 버터의 결정화를 재구성하는 방법으로, 적정 온도로 초콜릿을 녹인 후 재료를 잘 섞어주고, 원하는 특성을 가질 수 있도록 결정화시킬 수 있는 온도로 식히는 방법을 말한다. 템퍼링에 따라 코코아 버터의 결정화 형태가 결정되며, 일반적으로 상온에서 형태를 유지하고 부드러운 질감을 가지며, 유변학적으로도 안정된 형태로 유지되는 β 결정 상태를 수 있도록 템퍼링 조건을 설정해야 한다.^{12,16}

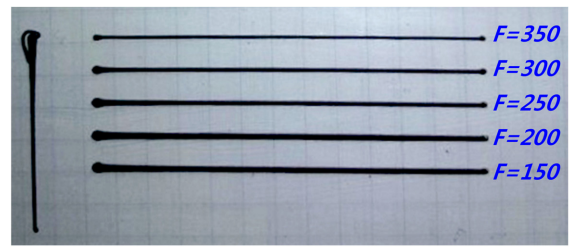
본 연구에서는 (주)브레드가든사의 초코펜 다크1을 출력재료로 사용하였다. 해당 재료의 템퍼링을 위해 전자레인지를 이용하는 방법을 사용하였다.¹⁷ 초콜릿 40 g을 700 W 전자레인지에서 15초 가열과 30초 교반하는 과정을 4회 반복하였고, 최종적으로 5초 가열 후 30초 교반을 수행하였다. 이 과정을 수행 후 초콜릿의 온도는 약 62°C 정도가 되었으며, 이를 수온 33.5°C에서 서냉시켰다.

초콜릿 재료의 점도(Viscosity)는 온도와 전단변형율(Shear Rate)의 영향을 받으며, 일반적으로 온도와 전단변형율이 증가할수록 점도가 낮아지는 특성을 갖는다.¹³ 그러나 온도가 지나치게 높을 경우 전술한 바와 같이 카카오 버터의 결정화에 영향을 미치게 되므로 출력온도는 32°C로 고정시키고, 전단변형율에 영향을 미치는 소재의 유동율(Flow Rate)과 압출부의 이송속도(Feed Rate)를 변화시키며 출력특성을 고찰하였다.

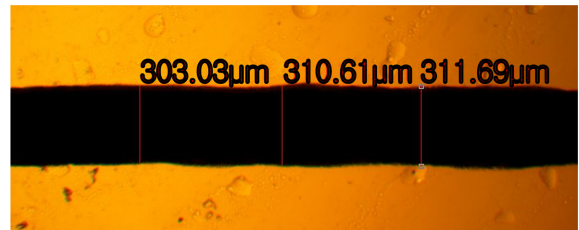
3.2 초콜릿 소재의 2차원 프린팅

3.2.1 선출력 실험

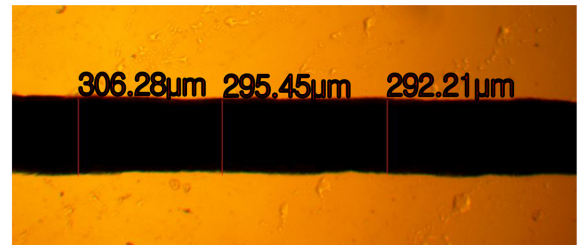
본 연구에서는 내경이 430 μm 인 22 G디스펜싱 노즐을 사용하였다. 기존의 초콜릿 프린팅 연구나 장비에서는 내경이 1 mm 근방인 노즐을 이용하였으나,¹⁰ 본 연구에서는 정밀도를 높이기 위하여 내경이 작은 노즐을 사용하였다. 3차원 출력을 하기 전에 다양한 출력 조건에 대하여 선을 출력하는 실험을 반복하여 출력되는



(a) Line test with feedrate



(b) Microscopic image ($F = 250$ mm/min)



(c) Microscopic image ($F = 300$ mm/min)

Fig. 4 Line test result

선폭을 확인하였다. 그 예로 다른 조건을 고정하고 이송속도를 변화시켜가면서 70 mm 선을 출력하였을 때, 출력 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 다른 조건들에 대해서 인자를 변경해 본 결과, 출력되는 선폭(w)은 초콜릿 종류, 초콜릿 출력 온도(T) 이외에 Fig. 5와 Table 2에 나타난 디스펜싱 노즐 내경(D), XY 스테이지의 이송속도(Feed Rate, F), 주사기 펌프의 피스톤 유동률(Flow Rate, γ), 적층높이(Layer Height, h) 등에 영향을 받는 것으로 나타났다. 여기서, 유동률(γ)은 스테이지의 이송속도 대비 디스펜싱 노즐에서의 출력되는 압출속도의 비율이다. 일반적으로 PLA (Poly Lactic Acid)나 ABS (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)를 출력하는 FDM 프린터에서 유동율을 계산할 경우에는 노즐이 지나간 후 부풀어 오르는 영향을 무시하고, 양옆이 반원 형상을 이룬다고 가정하여, 출력 단면적을 $A_{prim} = \pi r^2/4 + (w - h)h$ 로 계산하며,¹⁸ 이 때 A_{prim}/A_{nozzle} 를 유동율(γ)로 설정한다. 압출속도는 유동률과 이송속도의 곱이 되고, 출력 선폭은 이송속도와 직접적인 상관 관계가 없다. 그러나, 초콜릿의 경우 유동률과 이송속도가 출력 선폭에 모두 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 차이가 나타나는 원인은 PLA나 ABS의 경우, 용융점이 200°C 이상의 고온이므로 출력 후 급속하게 냉각이 진행되어 일정한 단면 형상을 유지하는 반면에 초콜릿의 경우 32°C에서 출력되므로, 이송속도가 작으면 대기에 의한 냉각이 둔화되면서 단면 형상이 변화하기 때문으로 추측된다.

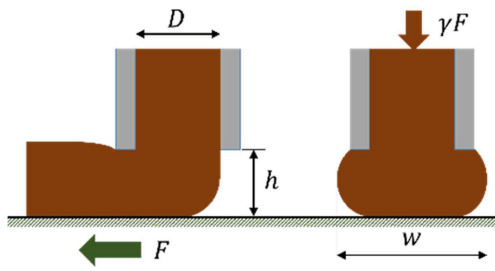


Fig. 5 Parameters for chocolate printing

Table 2 Parameters for experimental design

Parameter	Type	Range
Feed rate F	Design value	280 - 360 mm/min
Flow rate γ	Design value	68.8 - 133.6%
Layer height h	Design value	0.37 - 0.43 mm
Ambient temp. T_a	Fixed	26°C
Extrusion temp. T	Fixed	32°C
Needle size D	Fixed	430 μ m
Chocolate	Fixed	Choco pen (Dark)

3.2.2 실험계획법을 통한 출력조건 선정

원하는 선폭(w)을 출력하는 최적의 조건을 찾기 위하여 Table 2의 인자에 대하여 실험계획법을 수행하였다. 앞서 언급한 대로 출력 온도(T)가 설정값보다 높으면 초콜릿이 원하는 출력 높이로 분사되지 않고 출력기판에 내려앉거나, 굳지 않아서 쌓이지 않게 되는 문제가 발생하였기 때문에 초콜릿의 출력온도는 설계변수에 포함시키지 않았다. 이송속도(F)는 초콜릿이 출력되면서 충분히 형태를 유지할 수 있는 시간이 필요하기 때문에 320 ± 40 mm/min의 범위로 선정하였다. 적층높이(h)는 출력되는 초콜릿이 일정한 모양을 유지하고 형상을 유지할 수 있도록 노즐 내경(D) 보다 조금 늘린 0.4 ± 0.03 mm의 범위로 선정하였다. 유동율(γ)의 범위는 68.8 - 133.6%로 설정하였다. 출력된 초콜릿의 선폭(w)을 반응 변수로 정하였으며, 디스 펜싱 노즐의 내경과 동일한 0.43 mm를 목표 표로 하였다.

다양한 실험계획법 중에서 실험이나 시뮬레이션으로 얻은 수치 값으로부터 근사화 된 반응 표면을 생성하고 이를 국부적으로 적용시켜 최적해를 얻어내는 반응표면법(Respond Surface Method)을 선정하였다. 상대적으로 실험 횟수가 적지만 1차 및 2차 계수를 효율적으로 추정할 수 있는 3요인 Box-Behnken 설계를 이용하여 최적출력조건을 찾았다. 인자별 수준 범위에 따른 조건 13가지와 신뢰도를 검증 위하여 추가된 2가지 중복 조건에 대하여 Table 3의 실험테이블에 따라 실험을 수행하였다.

초콜릿의 점소성으로 인하여 시작 지점에서 출력이 지연되는 현상이 발생하므로, 스테이지를 이동하기 전에 미리 피스톤을 일정량을 이동하는 프리포지셔닝(Prepositioning)을 실시하였다. XY 스테이지와 주사기 펌프의 가감속도는 20 mm/sec로 설정하였고, 이송 속도 프로파일은 동기화하였다. 이론적으로 가감속 구간에서 선폭의 차이는 없어야 하지만, 가감속 구간에서 마찰과 압축

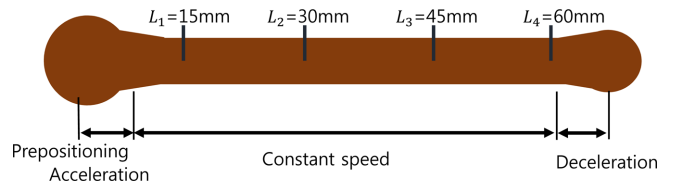


Fig. 6 Location of line width measurement

Table 3 Results of line test

Order	γ (%)	F (mm/min)	h (mm)	w (μ m)
1	68.82	320	0.43	403.41
2	100	280	0.43	380.69
3	133.63	360	0.40	379.33
4	100	360	0.37	381.49
5	68.82	360	0.40	376.90
6	68.82	320	0.37	412.61
7	100	360	0.43	355.79
8	100	320	0.40	420.46
9	100	280	0.40	408.82
10	100	320	0.40	482.40
11	133.63	320	0.43	410.99
12	133.63	280	0.40	505.41
13	100	280	0.37	541.13
14	100	320	0.40	497.03
15	133.63	320	0.37	579.01

성 등의 영향을 배제하기 위하여, 등속도로 이동하는 구간에 대하여 Fig. 6과 같이 15, 30, 45, 60 mm 지점에서 측정된 선폭(w)의 평균값을 사용하였다. 식(1)은 실험 결과에 의해 계산된 반응 표면을 이며, 결정계수 R^2 는 93.58%이고, 적합성 결여(Lack-of-Fit)는 0.908으로 모델의 적합성과 모델의 신뢰성이 모두 만족되는 것으로 확인되었다.

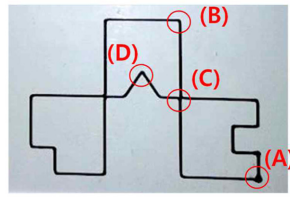
$$w = -1732.94 + 24.5721\gamma + 6.66668F + 1590.36h - 0.0180507\gamma F - 40.7693\gamma h + 28.0687Fh - 0.00708875\gamma^2 - 0.0267945F^2 - 9980.56h^2 \quad (1)$$

평균 선폭이 430 μ m인 선폭을 얻을 수 있는 최적 조건은 122.49%의 출력율과 356.8138 mm/min의 이송속도와 0.37 mm의 높이로 나타났다. 소프트웨어와 제어기의 유효숫자를 고려하여 실제로 사용하게 되는 조건은, 출력률(γ)를 122.49 % (실제로는 주사기펌프의 전진속도로 설정), 이송속도(F)를 360 mm/min, 적층높이(h)를 370 mm로 선정하였으며, 이에 따른 검증 실험을 수행한 결과, 평균 선폭(w)이 432.9 μ m로 약 0.7% 오차를 갖는다.

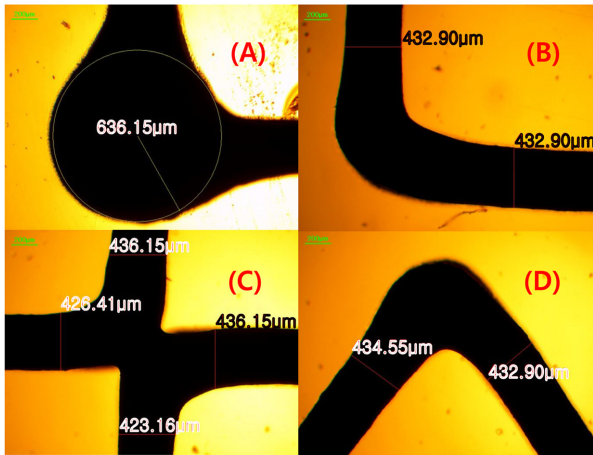
2차원 평면에서 연속된 선을 출력하여 모서리 부분에서 출력 결과를 검토하였다. Fig. 7은 서울과학기술대학교 로고를 출력하여, 모서리 부분을 현미경으로 살펴본 것이다. 출발점(A)를 제외



(a) Seoultech logo



(b) Logo printing



(c) Microscopic image

Fig. 7 2D printing test result

하고 대부분의 모서리에서 큰 오차없이 출력되었으며, 전구간에서 선폭이 일정하게 출력되는 것을 확인할 수 있다.

3.3 초콜릿 소재의 3차원 프린팅

입체 형상을 출력하기 위해서는 3차원 모델 파일과 이를 G-Code로 변환 시켜주는 소프트웨어가 필요하다. 본 연구에서는 오픈 소스 소프트웨어인 Cura를 사용하여 선폭에 맞게 출력하는 G코드를 생성하고, 이를 자체 제작한 소프트웨어를 통하여, 프리 포지셔닝과 유동율 등 일부 필요한 변수를 수정하였다.

3.3.1 직벽 형상의 출력성능 검증

복잡한 형상을 출력하기 전에 단일선을 쌓아 올려 입체를 출력하는 테스트를 수행하였다. Fig. 8과 같이 30 × 30 × 40 mm의 정사각형 벽을 쌓아서 출력이 가능한지 여부를 확인하였으며, 초콜릿을 적층하는데 문제가 없는 것으로 확인되었다.

3.3.2 경사면의 출력성능 검증

초콜릿 프린팅에서 경사진 모델을 지지대(Support) 없이 출력할 수 있는 최대 각도를 확인하기 위해 다양한 경사를 가진 형상의 출력 테스트를 수행하였다. Fig. 9는 수직방향에 대해 30°, 45°, 60° 경사도를 지닌 역피라미드를 만들고, 채우기 100%로 출력한 형상이다. 출력확인결과 30°와 45°는 문제 없이 출력되었으나, 60°에서는 출력물이 제대로 적층되지 못하였다. 이러한 각도는 채우기 및 외벽 두께 등의 조건에 따라 변화할 수 있다.

일반적인 출력 조건에서 좀 더 세분화하여 각도를 확인하기 위

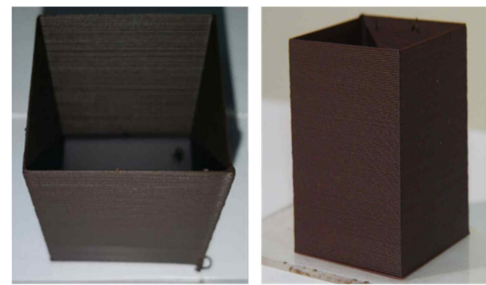


Fig. 8 Chocolate line stack test(30 × 30 × 40 mm)

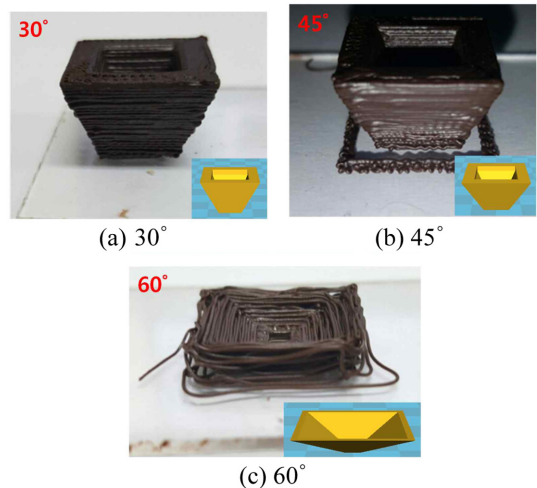


Fig. 9 Stack angle test for various angles

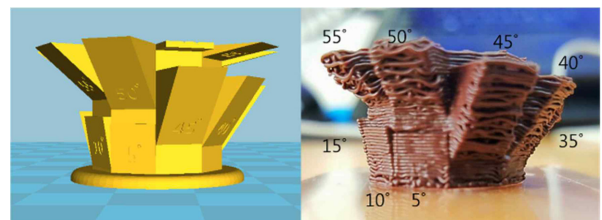


Fig. 10 Stack angle test with in-fill 40%

해서 Fig. 10과 같이 0 - 90°까지 5°간격으로 경사를 표현한 모델로 검증을 실시하였다. 일반적으로 출력 시간, 소재 사용량 등을 고려하여 채우기와 외벽 두께를 설정한다. 이 형상의 출력에서는 일반적인 출력조건과 동일하도록, 채우기를 40%, 외벽두께(Shell Thickness)를 선폭의 2배인 0.86 mm로 설정하였다. 출력확인 결과 45°까지는 문제없이 출력 되었으나, 그 이상의 각도에서는 벽면이 제대로 형성되지 않는 것을 보여주었다.

3.3.3 복잡한 3차원 형상의 출력성능 검증

Fig. 11은 크기가 31.3 × 32.6 × 30.1 mm인 장미를 출력한 형상을 보여준다. 모델의 장미 꽃잎은 10개이며, 두께는 0.8 mm이며 출력 레이어는 82개이다. 실제 출력물에는 외벽두께를 0.86 mm로 설정하였으므로, 모델보다 두텁게 출력되었으며, 꽃잎의 끝단에서 버(Burr)가 나타나기는 하였지만, 의도한 형상을 정밀하게 출력할 수 있음을 확인하였다.



Fig. 11 3D model of a rose and its print result

4. 결론

본 연구에서는 3차원 초콜릿 프린터를 개발하고 이를 출력하는 방법에 관한 연구를 수행하였다. 초콜릿은 코코아 버터, 코코아 매스, 당유 등의 혼합물이므로, 온도에 대해 유변학적 물성이 변화하고, 템퍼링에 따라 다른 결정화가 진행되므로, 이에 유의한 용융과 출력이 필요하다. 초콜릿을 용융하고, 압출할 수 있는 공급부를 설계, 제작하였으며, 3축 직교 로봇을 구성하고 제어부를 구성하였다. 본 연구에서는 기존의 3차원 초콜릿 프린터보다 높은 정밀도를 구현하기 위하여 출력 선폭이 $430\ \mu\text{m}$ 가 되도록 시스템을 구성하였다. 의도하는 선폭을 균일하게 출력하기 위하여 선을 출력하는 실험을 수행하였으며, 실험계획법을 이용하여 적합한 출력 조건을 결정하였다. 얻어진 출력 조건을 이용하여 2차원 형상이 원하는 선폭으로 출력되는 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 3차원 출력 실험을 수행하였다. 3차원 경사면 출력 실험을 통해 45° 의 경사면까지 지지대 없이 출력이 가능한 것을 확인하였으며, 이를 바탕으로 3차원 형상에 대한 프린팅을 성공적으로 수행할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B., "Additive Manufacturing Technologies," Springer, 2010.
- Yoo, C. J., Kim, H., Park, J. H., Yun, D. H., Shin, J. K., et al., "Study of Optimal Process Conditions of 3D Porous Polymer Printing for Personal Safety Products," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 33, No. 5, pp. 333-339, 2016.
- Yi, H. W., Lee, Y. M., Shin, B. S., Lee, T. G., and Kang, M. C., "Prototype Manufacturing Using 3D Printing and Characteristics of Flow Rate and Dynamics for High Temperature Solenoid Valve," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 33, No. 5, pp. 341-348, 2016.
- Lee, J. E., Lim, Y. E., and Park, K., "Finite Element Analysis of a Customized Eyeglasses Frame Fabricated by 3D printing," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 40, No. 1, pp. 65-71, 2016.
- Frazier, W. E., "Metal Additive Manufacturing: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23, No. 6, pp. 1917-1928, 2014.
- Leuven, K., "Additive Manufacturing of Ceramics: A Review," *Journal of Ceramic Science and Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 245-260, 2014.
- Park, S. H., Park, J. H., Lee, H. J., and Lee, N. K., "Current Status of Biomedical Applications Using 3D Printing Technology," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 12, pp. 1067-1076, 2014.
- Wegrzyn, T. F., Golding, M., and Archer, R. H., "Food Layered Manufacture: A New Process for Constructing Solid Foods," *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 66-72, 2012.
- Lipton, J. I., Cutler, M., Nigl, F., Cohen, D., and Lipson, H., "Additive Manufacturing for the Food Industry," *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 43, No. 1, pp. 114-123, 2015.
- Hao, L., Mellor, S., Seaman, O., Henderson, J., Sewell, N., et al., "Material Characterisation and Process Development for Chocolate Additive Layer Manufacturing," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 5, No. 2, pp. 57-64, 2010.
- Afoakwa, E. O., Paterson, A., and Fowler, M., "Factors Influencing Rheological and Textural Qualities in Chocolate-A Review," *Trends in Food Science and Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 290-298, 2007.
- Talbot, G., "Chocolate and Cocoa Butter-Structure and Composition," in *Cocoa Butter and Related Compounds*, Garti, N. and Widlak, N. R. (Eds.), AOCS Press, pp. 1-21, 2012.
- Beckett, S. T., "Industrial Chocolate Manufacture and Use," Blackwell, 2011.
- Wijnen, B., Hunt, E. J., Anzalone, G. C., and Pearce, J. M., "Open-Source Syringe Pump Library," *PLoS One*, Vol. 9, No. 9, Paper No. 107216, 2014.
- RepRapWiki, "Marlin," <http://reprap.org/wiki/Marlin> (Accessed 9 MAR 2017)
- Loisel, C., Keller, G., Lecq, G., Bourgaux, C., and Ollivon, M., "Phase Transitions and Polymorphism of Cocoa Butter," *Journal of the American Oil Chemists's Society*, Vol. 75, No. 4, pp. 425-439, 2010.
- Callebaut Chocolate, "How to Temper by Microwave," <https://youtu.be/7MwjSUdcFI0> (Accessed 9 MAR 2017)
- Slic3r Manual, "Flow Math," <http://manual.slic3r.org/advanced/flow-math> (Accessed 9 MAR 2017)