

3차원 프린팅(3DP) 공정을 기반으로 한 임의형상제작(SFF) 시스템 개발에 관한 연구

이원희*, 김동수#, 김정수**, 이민철***

A Study on the Development of SFF System based on 3DP Process

Won Hee Lee*, Dong Soo Kim#, Jung Su Kim** and Min-Cheol Lee***

ABSTRACT

Nowadays, Three dimensional printing (3DP) technique that is one of solid freeform fabrication (SFF) technology has been notable issue, and has been applied by various fields. The SFF system can fabricate three dimensional objects of solid freeform with high speed and low cost using ink jet printing technology. In this research, a SFF system to analyze 3DP process technology is developed. We applied sliding mode control with sliding perturbation observer (SMCSPO) algorithm and minimized position error to the developed SFF system. We analyzed and optimized process variables such as jetted volume, layer thickness, powder bed and so on experimentally. Also, the dimensional error of a developed SFF system is evaluated. Finally, the feasibility of application to bio manufacturing is presented through successful fabrication of teeth and cranium model.

Key Words : SFF(임의형상제작), 3DP(3차원프린팅), Inkjet print head(잉크젯 프린터헤드)

기호설명

r = radius of pore
 γ = surface tension of binder
 μ = viscosity of binder
 θ = contact angle on pore side
 h = penetration depth of binder
 τ = relaxation time
 d = drop diameter
 η = viscosity of air
 ρ = drop density

v_i = initial ejected drop speed

1. 서론

오늘날 빠르게 변화하는 시장에 대응하기 위해 제품의 개발 사이클 또한 그 만큼 짧아져 가고 있다. 즉, 'Time to market'의 구호아래 임의형상제작(SFF; solid freeform fabrication) 기술이 현재의 수준으로 발전하게 되었다. 최근 SFF기술은 RT(rapid tooling), RM(rapid manufacturing)으로 응용분야가 확대되어 가고 있다.^{1,2} FDM(fused

접수일: 2005년 12월 5일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

* 한국기계연구원 정보장비연구센터

교신저자: 한국기계연구원 정보장비연구센터

E-mail kds671@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7152

** 부산대학교 대학원

*** 부산대학교 기계공학부

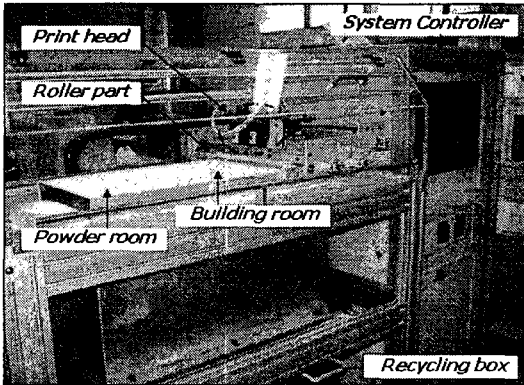


Fig. 1 Developed SFF system for office type

deposition modeling), SL (stereo lithography), SLS (selective laser sintering), LOM(laminated object manufacturing, 3DP (three dimensional printing) 등, 대부분의 SFF 기술들은 레이어 기반 공정기술 (LMT; layer manufacturing technology)을 바탕으로 하고 있다. 오늘날, 3DP 기술은 많은 관심을 받으며, 다양한 분야에서 응용되고 있는 SFF 기술 중 하나이다.^{1,3} 특히 이 기술은 잉크젯 기술을 기반으로 고속 프린팅이 가능하며, 저가의 시스템 구성이 가능하다.

본 연구에서는 3DP 공정을 기반으로 한 오피스용 SFF 시스템을 개발하였다. 개발된 오피스용 SFF 시스템은 컨셉모델러(concept modeler)이며, 저가, 고속 제작을 목표로 한다. 고속 제작을 위해 3개의 카트리지를 사용하여 900개의 노즐을 동시에 제어하였다. 또한 다양한 공정 실험을 통해 3DP 공정변수를 분석하고, 치수오차를 검증하였다. 그리고 개발된 오피스용 SFF 시스템을 바이오 분야에 적용하여, 3차원의 복잡한 임의형상을 성공적으로 제작하였다.

2. 시스템 구성

2.1 기구부 설계

오피스용 SFF 시스템의 기구부는 5축으로 구성되어 있으며 Fig. 1과 같다. 시스템은 고속 프린팅을 위한 X,Y 이송부와 파우더 공급을 위한 롤러부(roller part), 일정 두께로 적층하기 위하여 상, 하로 움직이는 피딩룸(feeding room)과 빌딩룸(building room)으로 구성되어 있다.

프린팅을 위한 X,Y축 이송부는 잉크젯 프린터 헤드 (inkjet print head)를 장착한 상태에서 고

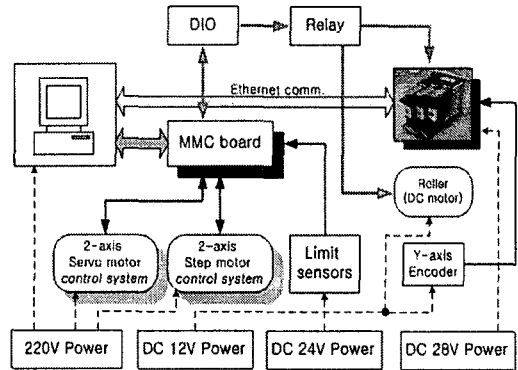


Fig. 2 Schematic diagram of SFF system

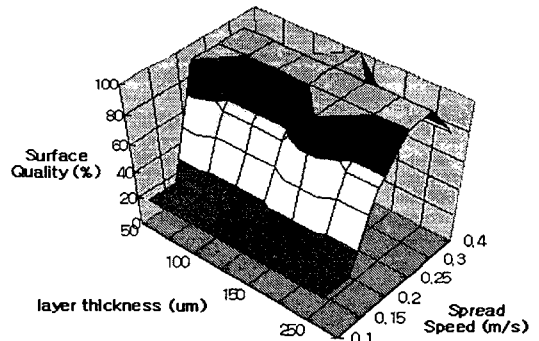


Fig. 3 The surface quality test of powder bed

속 이송이 요구되는 X축 및 Y축과 롤러부가 장착된 X축으로 이루어진다. 특히, 저가의 고속 시스템 구현을 위하여 타이밍 벨트 시스템을 채택하였다. 롤러부는 파우더공급을 위한 롤러와 피딩룸 및 빌딩룸 외부로의 파우더 누설을 방지하기 위한 가이드 그리고 롤러에 달라붙는 파우더를 제거하기 위한 장치로 구성되어 있다. 롤러부의 역할은 빌딩룸에 레이어 두께에 해당되는 파우더베드(powder bed)를 형성하는 것이며, 최대한 평탄화된 면을 제공하는 것이다. 파우더베드의 두께는 Z축의 제어정밀도에 의해 결정되나, 평탄도는 파우더 입자의 크기, 균일성과 롤러의 회전속도, 이송속도, 표면상태 등의 영향을 받는다.

피딩룸의 파우더 한 층에 대한 공급 레이어 두께는 외부로의 누설을 고려하여 빌딩룸의 레이

어 두께의 1.5배로 설정하였다. 그리고 톨러의 회전속도는 180rpm으로 설정하였으며, 실험결과 Fig. 3과 같이, 전체적으로 톨러의 이송속도가 0.25~0.3m/s 일 때 최적의 파우더베드가 형성됨을 확인하였다.

2.2 제어시스템의 구성

오피스용 SFF 시스템의 제어를 위해 MMC 보드를 이용한 PC기반의 위치 제어 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. 그리고 X,Y 축의 고속 서보 제어를 위해 속도 모드로 SMCSPO (sliding mode control with sliding perturbation observer) 알고리즘을 적용한 속도모드 제어를 구현하였다. SMCSPO 알고리즘은 슬라이딩 섭동관측기를 통해 섭동항으로 가정한 시스템의 비선형성이나 외란과 모델식의 불확실성에 대해 관측하고 그것을 보상함으로써 강인한 제어를 가능하게 하는 알고리즘으로 알려져 있다.^{4,5}

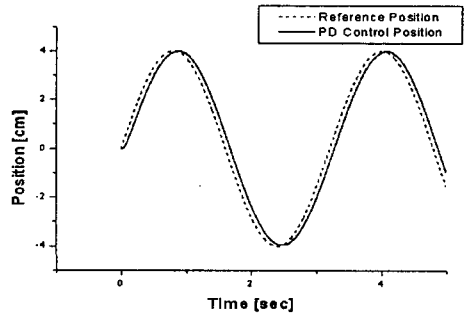
2.3 속도모드 제어 실험

제어 주기는 5ms로 주었고 X축의 엔코더 신호를 피드백 받아서 제어를 하였다. 모터의 불감대 영역이 위치에 따라서 다르게 존재함으로 그 영향과 속도의 변화에 따른 위치 제어 결과를 보기 위해 40mm씩 왕복 운동하는 정현파를 제어입력으로 주었다. 또한 같은 방법으로 PD 제어와 비교하였다.

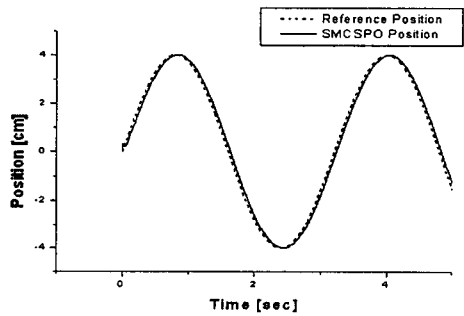
Fig. 4(a)에서 보듯이 모터의 불감대 영역에 대응하는 토크를 충분히 줄 수 있어 PD 제어에서는 위상 지연현상이 크게 나타났고 2배 이상의 계인을 가질 경우에도 위상 지연현상은 변화가 없었다. 하지만 Fig. 4(b)에서 보이는 것과 같이 SMCSPO 알고리즘을 이용한 속도 모드 제어에서는 위상 지연 현상이 크게 줄었다. 이는 섭동 관측기를 통한 섭동의 보상에 의해 모델의 오차, 비선형 요소 등에 대해 강인함을 보여 주는 것으로 위상 지연현상이 거의 없고 모터의 불감대 영역이 있음에도 기준입력을 잘 추종하였다.

Fig. 5에서 보듯이 PD 제어의 경우 위상 지연 현상으로 인해 최대 오차가 약 600 μ m 이었고 SMCSPO 알고리즘의 경우 약간의 위상 지연 현상으로 약 300 μ m 이었다. 또한 위상 지연 현상을 고려하지 않고 최대 피크 치인 40mm에 대한 오차는 PD 제어의 경우 39.81mm로 약 200 μ m의 오차를 가

졌고 SMCSPO 알고리즘의 경우 40.02mm로 약 20 μ m의 오차를 가졌다. SMCSPO 알고리즘을 이용한 속도 모드 제어의 경우 상대적으로 좋은 응답 특성

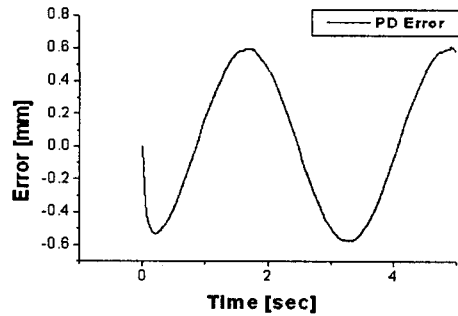


(a) PD control



(b) SMCSPO

Fig. 4 Control result in velocity mode



(a) PD control

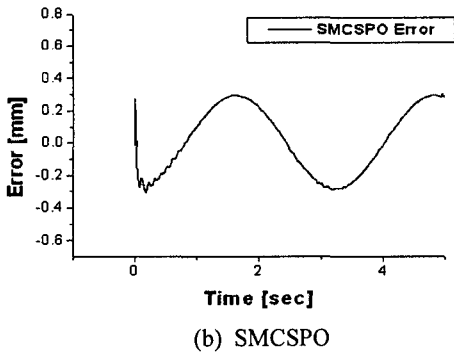


Fig. 5 Position errors in velocity mode control

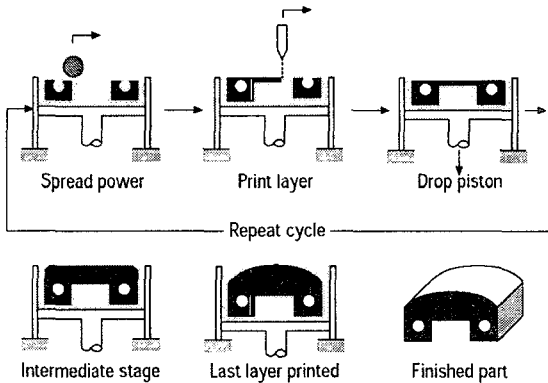


Fig. 6 The sequence of operation in 3DP

을 얻을 수 있었으며, 개발 시스템이 컨셉모델러인 점을 감안할 때 오피스용 SFF 시스템에 적용하기에 충분하다고 판단된다.

3. 3차원 프린팅 공정

3.1 3차원 프린팅(3DP) 공정

3DP 공정이란, Fig. 6과 같이 파우더베드 위에 임의 형상의 최하위 레이어의 단면을 프린팅하고, 프린팅된 단면 위에 다시 일정량의 파우더를 적층한 뒤, 다음 레이어의 단면을 프린팅한다. 이러한 과정을 최상위 레이어 까지 반복함으로써 3차원 형상을 제작하는 공정을 말한다.⁶ 이때, 파우더베드 위에 프린터 헤드를 통하여 저 점성의 바인더(binder)를 선택적으로 분사하게 된다. 그러므로 프린팅된 영역은 바인딩 용액에 의해 경화되고, 모든 레이어의 작업이 완료되면, 경화시

간을 가진 후, 프린팅 되지 않은 영역의 파우더를 제거해 주면 3차원의 임의형상물 제작이 완료된다.

3.2 비트맵 파일 생성

오피스용 SFF 시스템에서 프린팅을 하기 위한 공정은 Fig. 7과 같다. 3차원 스캐너 또는 CAD로부터 STL 파일을 받아들여 일정량의 두께로 슬라이싱 파일을 생성한다. 슬라이싱 파일은 점 데이터로 구성되어나, 프린팅하기 위해서는 비트맵(bitmap) 파일로의 변환이 필요하다.

그러나 상용 S/W에서 제공되는 슬라이싱 파일은 점 데이터로 구성된 컨투어(contour) 정보만

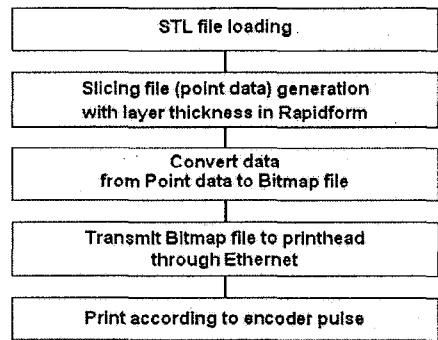


Fig. 7 Printing process of a SFF system for office type

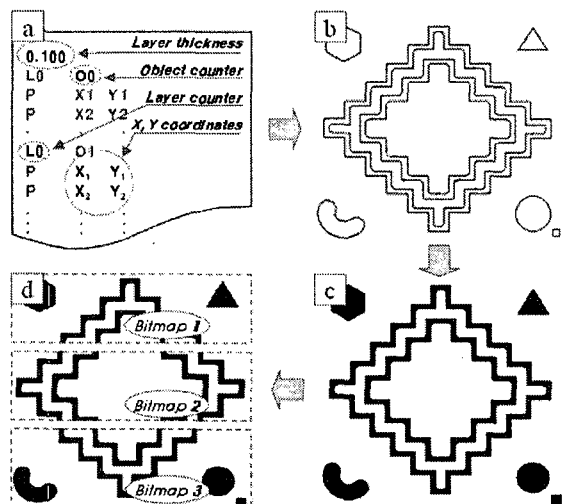


Fig. 8 Bitmap file generation from slicing file

을 가지고 있어, 3차원의 형상을 2차원의 비트맵으로 표현하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 Fig. 8 (a)와 같이 슬라이싱 파일에 레이어 두께, 레이어 식별 번호, 물체 식별 번호 등의 정보를 추가하여 비트맵 생성을 용이하게 하였다. 비트맵 파일 변환시 Fig. 8 (b)와 같이 한 레이어에 여러 개의 컨투어가 존재 할 경우, 필링 영역(filling area)을 판단해야 한다. 즉 어떤 컨투어 내부에 또 다른 컨투어가 존재할 경우와 외부에 존재 할 경우 등에 대해 고려해야 한다. 따라서 포인트 좌표와 레이어 정보, 컨투어 정보 등을 이용하여 필링 영역을 구분할 수 있는 비트맵 생성 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 XOR을 이용한 색 반전 방법을 적용하여 Fig. 8 (c)와 같이 비트맵을 생성하였다. 생성된 비트맵 파일을 프린터 헤드에서 프린팅 하기 위하여 비트맵의 높이를 38.1mm 단위로 분할 저장하여 이더넷을 통해 프린터 헤드로 넘겨주면 프린팅을 위한 준비 작업은 완료된다.⁷

3.3 프린터 헤드 제어

본 연구에서는 파우더 표면에 바인더를 선택적으로 분사하기 위하여 Fig. 9와 같이 HP사의 버블젯(bubble jet) 프린터 헤드를 사용하였다. 버블젯 방식의 프린터 헤드는 챔버 또는 노즐 내에 설치된 히터에 순간적인(2~6 μ s) 펄스를 가하여 히터의 온도를 급상승 시켜 히터 벽면에 버블을 형성한다. 생성된 버블에 의한 압력 강하로 챔버 또는 노즐 내에 있는 액체가 노즐 밖으로 분사되는 방식이다.⁸

프린터 헤드는 엔코더를 통해서 헤드의 위치 정보를 피드백 받아, 비트맵 정보와 비교한 후, 각 노즐을 on/off 제어한다. 프린팅에서의 중요 변수는 등속주행과 상, 하 각 카트리지가간의 정렬문제이다. 이는 스티칭 (stitching) 이라고도 하며, 상, 하 카트리지가간의 경계면을 정확히 일치시키기 위하여 카트리지당 4개의 노즐이 중첩 되도록 기구적으로 설계하였다. 실험을 통해 중첩되는 부분의 노즐을 제어함으로써 카트리지가간의 경계면에서 중복이나 틈이 발생하지 않도록 하였다. 그리고 상, 하 정렬이 맞다 하더라도 프린터 헤드의 이동 속도가 가변된다면, 출력되는 이미지 영역에서는 뒤틀림 현상이 발생한다. 이러한 현상은 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 대면적을 인쇄하기 위하여 각 카트리지의 노즐위치를 기구학적으로 읍셋을 가지

도록 설치하였기 때문이다. 각각의 카트리지에서 인쇄할 수 있는 영역은 0.5 인치이고, 구조적으로 3개의 카트리지가 작동되는 시간이 모두 다르게 된다. 그러므로 엔코더 펄스를 받아 프린터 헤드를 제어하지만, 이송속도가 갑자기 변화 될 경우 수백 마이크로미터의 위치오차가 발생할 수 있다. 실험에 사용된 프린터 헤드는 HP-Desktop[®]용 45 series이며, 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 카트리지 당 300개의 노즐을 가지고 있어 고속 프린팅이 가능하다. 3차원 프린팅에서 레이어 두께의 변화에 따라 분사량 또한 가변 되어야 한다. 분사량 측정을 위해 제어입력으로는 버블젯 프린터 헤드의 히터부에 가하는 펄스 신호

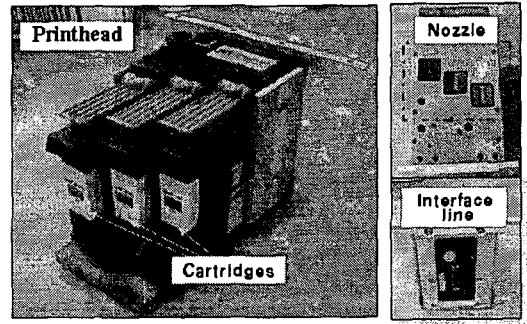


Fig. 9 The inkjet print head system

Table 1 Spec. of inkjet print head system

Items	Specification
Diameter of nozzle	40 μ m
Number of nozzle	300/cartridge, total 900
Number of cartridge	3 ea (max. 12 ea)
Printing area	0.5 inch/cart., total 1.5 inch
Resolution	600 x 600 dpi (42.3 μ m)
Communication	Ethernet port, RS-232C port, DIO port, Power port

(fire pulse length)를 이용 하였다. 측정결과 Fig. 10과 같으며, 약 4.6 μ s 정도의 신호를 인가할 때 최대 분사량을 얻을 수 있었다.

3.4 공정의 한계

3.4.1 공정율

3차원 프린팅 공정은 크게 파우더베드 형성, 바인더 프린팅, 파우더 내부로 바인더의 침투와

건조로 구성되며, 전체 공정율은 이 3가지 기술들의 조합에 따라 달라진다.

파우더베드 형성 속도는 3~5s/layer 정도이며, 레이어 Z축 피딩률 및 빌딩률의 이송속도와 롤러 이송축의 이송속도에 의해 결정된다. 고속 프린팅을 위해 다수의 노즐을 이용하고 있으며, 본 연구에서는 900개의 노즐을 동시 제어하였다. 그 결과 600dpi의 분해능을 가지면서 100mm/s의 속도로 프린팅 가능하다. 바인더의 침투속도는 바인더의 점성 및 표면장력뿐만 아니라, 파우더베드의 공극율과 친수성에 의해 결정되며, Washburn equation에 의해 식(1)과 같이 근사화 될 수 있다.^{6,10}

$$V = \frac{r\gamma \cos\theta}{4\mu h} \quad (1)$$

여기서 r 은 공극의 반지름이며, γ 와 μ 는 바인더의 표면장력과 점성이다. θ 는 공극면에 닿는 바인더의 접촉각이고, h 는 바인더의 침투 깊이를 나타낸다. 실험에 사용된 파우더베드의 공극은 2 μm 이며, 표면장력과 점성은 각각 33mN/m와 1.3mPas 이다. 레이어 두께 100 μm 일 때, 식(1)에 의하면 침투속도 V 는 168 $\mu\text{m/s}$ 이다.

그리고 이송부에 부착된 프린터 헤드를 통해서 분사된 마이크로 드롭의 궤적은 Stokes law에 의해 결정된다.^{8,9} 프린터 헤드의 노즐 끝단에서 분사되어 정상상태까지 도달하는데 걸리는 시간, 즉 완화시간(relaxation time) τ 는 식(2)와 같다.

$$\tau = \frac{1}{18} \frac{d^2}{\eta} \rho \quad (2)$$

여기서, d 는 드롭 직경이고, ρ 는 드롭의 밀도, η 는 공기의 점성이다. 그리고 수직방향으로 분사된 드롭 궤적의 고속영역은 식(3)으로부터 얻을 수 있다.

$$v(t) = \tau g + (v_i - \tau g)e^{-t/\tau} \quad (3)$$

여기서, v_i 는 초기분사 속도이다. 또한 완화시간을 기반으로 근사적인 시간에 대한 드롭의 위치를 식(4)로부터 계산할 수 있다.

$$D(t) = \tau gt + \tau(v_i - \tau g)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (4)$$

Fig. 11은 드롭 직경에 따른 마이크로 드롭의 시간에 대한 속도와 거리 값을 계산한 결과이다. 노즐 끝단과 파우더베드 사이의 거리가 약 1mm일 때, 분사된 드롭이 파우더베드까지 소요시간은 약 1.1ms 임을 계산을 통해 알 수 있다.

3.4.2 기하학적 제어

3차원 프린팅에서 기하학적인 제어 요소는 제품의 치수 오차와 최소형상물의 크기(feature size)이다. 이 두 가지 문제는 파우더와 바인더의 상호작용에 강한 영향을 받는다.¹⁰ 이러한 영향력 있는 변수로는 파우더의 재료, 크기, 분포, 형상, 파우더베드의 표면상태 및 패킹밀도 (packing density)와 바인더의 재료, 점성, 표면

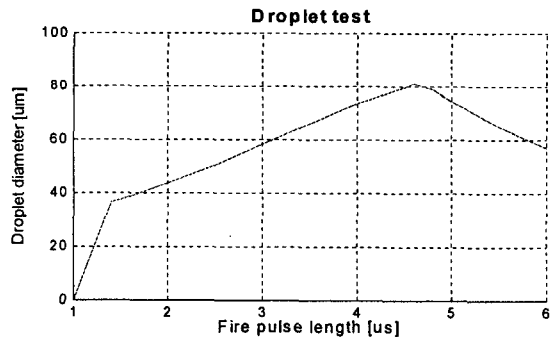
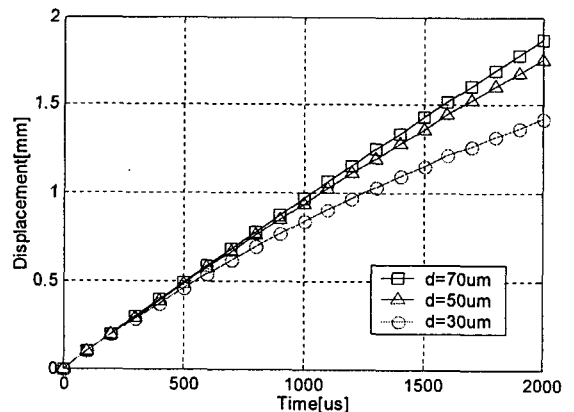


Fig. 10 The droplet diameter according to pulse length



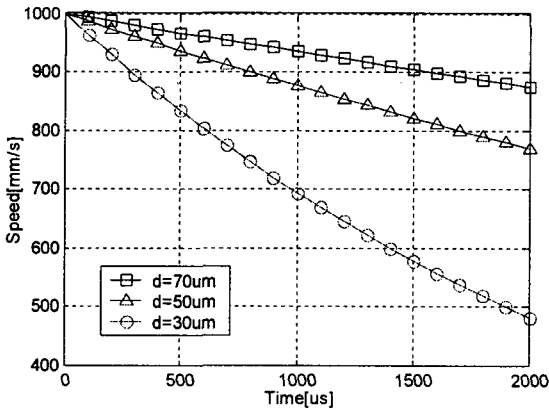


Fig. 11 Speed and position of ejected microdrop

장력, 드롭렛 (droplet)의 크기, 속도, 주파수 그리고 파우더와 바인더의 온도, 후처리 공정 등이 있다.

최소형상물의 크기는 주로 파우더 및 드롭렛의 크기, 드롭렛의 전성 (spreading) 및 침투율, 기구적인 위치오차에 의해 결정된다. 실험에 사용된 Zp102® 파우더의 크기는 5~10μm이며, 드롭렛의 크기는 40~90μm이다. 드롭렛의 크기가 작을수록 최소형상물의 크기를 작게 가져갈 수 있다. 그리고 바인더의 침투율은 바인더의 점성과 바인더와 파우더베드 경계면에서의 바인더 표면에너지와 접촉각 그리고 파우더 베드에서의 공극의 분포에 의해 결정된다.

제품의 치수 오차는 주로 레이어 두께오차, 드롭렛의 위치오차, 드롭렛 전성의 재현성, 경화시 수축문제, Z-growth현상에 의해 결정된다. 레이어 두께 및 드롭렛의 위치오차는 기본적으로 기구부적인 문제와 직결되어 있다. 오피스용 SFF 시스템에서 레이어 두께의 누적오차는 100μm이내이며, 드롭렛의 최대 위치오차는 X, Y 이송부의 오차를 포함한 약 50μm이다.

그리고 전성의 재현성은 파우더 베드의 밀도가 일정하고 사용된 재료가 동일하다 하더라도 베드의 표면 상태에 따라 오차가 달라진다. 수축은 바인더가 경화될 때 발생하며, 파우더베드의 밀도에 따라 달라진다. 3DP 공정에서는 제작공정에서보다 후처리 공정에서 고속 경화가 일어나며, 이때 수축에 의한 뒤틀림 등의 현상이 발생할 수 있다. 마지막으로 Z-growth 현상은 파우더를 기반으

로 하는 공정에서 대표적으로 나타나는 현상으로 상부와 하부의 층 결합을 위하여, 레이어 두께 이상의 바인더가 요구된다. 그 결과 최 하단의 레이어에 분사된 바인더가 필요 이상으로 하부의 파우더로 스며들면서 불필요한 부분을 경화시키는 현상을 말한다. *

4. SFF 실험

4.1 치수 오차

3차원 구조물의 치수오차를 검증하기 위하여 다양한 공정 변수를 변화시켜 가며 Fig. 12와 같이 스케일 바를 제작하였다. 실험결과, X, Y 축의 치수 오차는 대부분 X, Y 스테이지의 위치 오차에 의해 발생됨을 확인하였다. 하지만, Z축의 경우 1차적으로 Z축의 위치오차에 의한 영향도 받지만, 주로 레이어 두께와 바인더의 분사량 관계에 의해 발생하는 Z-growth 현상에 의한 오차가 지배적임을 확인하였다.

Fig. 13 (a)는 레이어 두께를 일정하게 하고, 분사량을 가변시킬 때의 치수오차를 나타낸 것이며

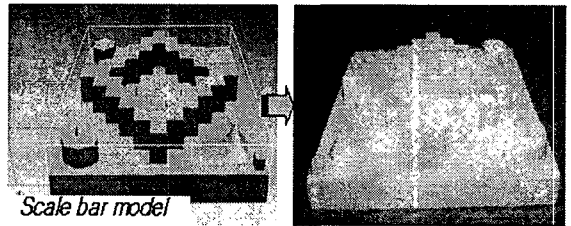
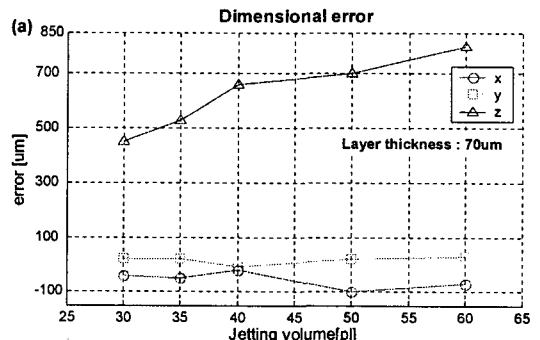


Fig. 12 Scale bar fabricated by the SFF system



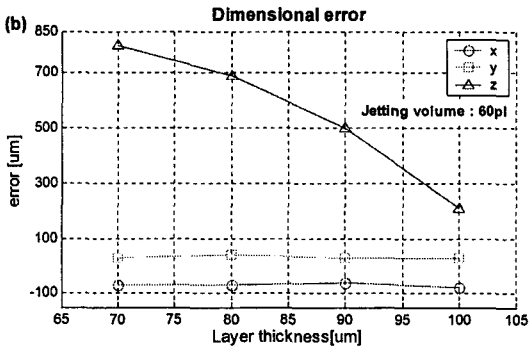


Fig. 13 Dimensional error of a fabricated parts

Fig. 13(b)는 분사량을 일정하게 두고, 레이어 두께를 가변시킬 때의 치수오차 변화에 대한 측정 결과이다. 실험결과 분사량을 일정하게 두고, 레이어 두께를 높이면 치수오차가 감소되었다. 그러나 동시에 제품의 강도가 함께 낮아지므로 층결합을 유지하기 위해서는 일정량 이상의 치수오차는 불가피함을 확인하였다.

4.2 바이오 분야 응용실험

개발된 오피스용 SFF 시스템을 이용하여 치아 및 두개골 등의 생체 모형 제작 실험을 통하여, 바이오 분야의 적용 가능성을 확인 하였다. 1차 시제품 제작에서는 치아 형상의 모델을 제작해

Table 2 Test conditions of a teeth fabrication

Items	Specification
layer thickness	100 μ m
droplet diameter	75 μ m (pulse length:5 μ s)
layer count	340 layers
model size	70mm \times 55mm \times 34mm
powder & binder	Zp102(plaster), Zb56
printing resolution	600 \times 600dpi

Table 3 Test conditions of a cranium fabrication

Items	Specification
layer thickness	70 μ m
droplet diameter	80 μ m (pulse length:4.7 μ s)
layer count	2142 layers
model size	150mm \times 120mm \times 148mm
powder & binder	Zp102(plaster), Zb56
printing resolution	600 \times 600dpi

보았으며, 실험조건은 Table 2와 같다. 실험결과 Fig. 14와 같이 3차원 치아형상의 구조물을 성공적으로 제작 하였다. 그리고 일정한 강도를 유지하고 있어, 후처리 또한 시제품의 손상 없이 깨끗하게 처리 할 수 있었다. 2차 시제품으로 두개골 데이터를 이용하여 제작 실험을 수행하였다. 제품의 결합강도와 단차현상을 줄이기 위하여 레이어 두께를 70 μ m로 하고, 바인더의 양을 최대 80 μ m로 설정하였다. 기타 제작조건은 Table 3과 같다.

Fig. 15는 두개골 모델의 전체 제작공정도이다. 실험결과 두개골 형상 제작에서 프린팅 시간은 약 4시간 정도 소요되었다. 그리고 X, Y 축의 치수 정밀도는 $\pm 100\mu$ m 이내에 들었으며, Z축의 경우 800 μ m의 치수 오차가 발생하였으나, 이는 앞서 설명한 Z-growth 현상에 의해 최 하부 레이어에서 주로 발생됨을 확인 하였다. 두개골 내부의 섬세한 부분까지 성공적으로 제작 될 수 있음을 확인 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 3DP 공정을 기반으로 SFF 시스템을 개발하였다. 특히, 시스템의 설계에서부터 응용까지 전 과정을 나타내었으며, 세부적인 연구결과는 아래와 같다.

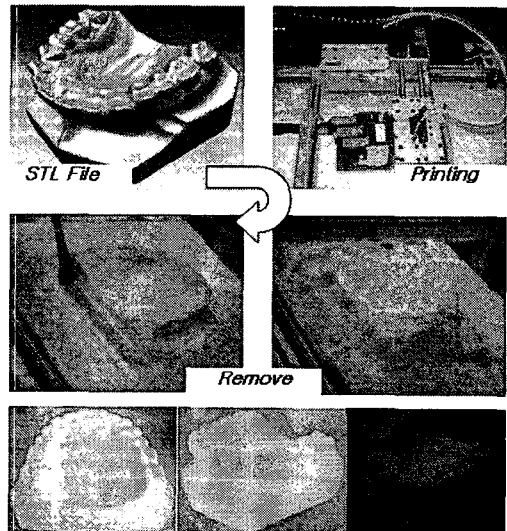


Fig. 14 Teeth model fabrication

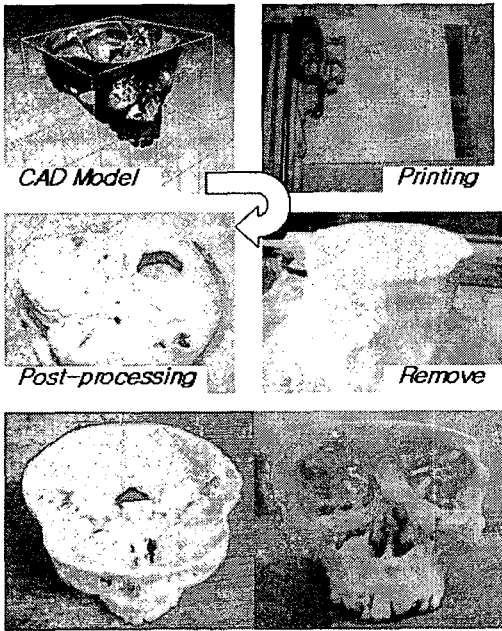


Fig. 15 Cranium model fabrication

1) 기구부의 고속 위치제어를 위해 SMCSPO 알고리즘을 제안하였으며, SMCSPO 속도모드 제어를 수행함으로써 위치오차를 $20\mu\text{m}$ 이내로 최소화 하였다.

2) 3차원 프린팅 공정을 제시하고, 프린터 헤드 제어 및 분사량, 레이어 두께, 파우더베드 등의 공정 변수를 분석하였다. 그 결과 바인더의 침투 속도는 $168\mu\text{m/s}$ 이며, 펄스 신호가 $4.7\mu\text{s}$ 일 때 최대 분사량을 얻을 수 있었다.

3) 실험을 통해 개발된 SFF 시스템의 3축에 대한 치수오차를 검증하였으며, X, Y 축은 $\pm 100\mu\text{m}$ 이내에 들었으며, Z축은 $300\sim 800\mu\text{m}$ 의 치수오차를 가졌다. 분사량을 줄일수록 Z축의 치수오차는 작아지나, 결합력이 약화되어 제품의 강도가 함께 낮아지는 특징이 있다.

4) 치아 및 두개골 등의 시편 제작에 성공함으로써 바이오 응용분야에 적용 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 “디지털 3차원 실물 복제기 개발” 과제 지원으로 이루어졌으며, 관계

자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Wohlers, T. T., “Wohlers Report 2003,” Wohlers Associates, pp. 14-35, 2003.
2. Yan, X. and Gu, P., “A review of rapid prototyping technologies and systems,” *Compute Aided Design*, Vol. 28, No. 4, pp. 307-318, 1996.
3. Chang, C. C., “Rapid prototyping fabricated by UV resin spray nozzles,” *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 10, No. 2, pp. 136-145, 2004.
4. Moura, T.J., Elmali, H. and Olgac, N., “Sliding Mode Control With Sliding Perturbation Observer,” *Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 119, pp. 657-665, 1997.
5. You, K. S. and Lee, M. C., “Sliding Mode Controller with Sliding Perturbation Observer Based on Gain optimization Using Genetic Algorithm,” *Int. Journal KSME*, Vol. 18, No. 4, pp. 630-639, 2004.
6. Williams, P. A., “A New Process To Fabricate Prototypes Directly From CAD Model,” PhD. Thesis, MIT, pp. 12-46, 1990.
7. Kim, D. S., Lee, W. H., Ahn, Y. G., Jang, M. H. and Choi, K. H., “Development of Digital 3D RODS and Process Technology,” *J. of KSPE*, Vol. 23, No 4, pp. 183-190, 2006.
8. Lee, E. R., “Microdrop Generation,” CRC press, pp. 15-29, 2003.
9. Parker, C. R., “Aerosol science and technology,” McGraw-hill, 1993.
10. Bredt, J. F., “Binder Stability and Binder /Powder Interaction in Three-Dimensional Printing,” PhD. Thesis, MIT, 1995.