

액체 재료 직접주사방식 SFF에서 노즐 위치에 따른 적층 특성

정현준*, 이인환#, 김호찬**, 조해용***

(* 충북대학교, # 충북대학교, ** 안동대학교, *** 충북대학교)

Characteristics of Surface Lamination according to Nozzle Position in Liquid Direct Writing SFF

Hung Jun Jung*, In Hwan Lee#, Ho-Chan Kim**, Hae Yong Cho***

(Received 26 June 2013; received in revised form 16 September 2013; accepted 27 March 2014)

ABSTRACT

Direct writing(DW) is a method of patterning materials to a substrate directly, without a mask. It can use a variety of materials and be applied to various fields. Among DW systems, the flow-based type, using a syringe pump and nozzle, is simpler than other types. Furthermore, the range of materials is exceptionally wide. In additive processes, a three dimensional structure is made of stacking layer. Each layer is made of several lines. In this regard, good surface roughness of fabricated layers is essential to three dimensional fabrication. The surface roughness of any fabricated layer tends to change with the dispensing pattern. When multiple layers fabricated by a nozzle dispensing system are stacked, control of the nozzle position from the substrate is important in order to avoid interference between the nozzle and the fabricated layer. In this study, a fluid direct writing system for three dimensional structure fabrication was developed. Experimentsto control the position of the nozzle from substrate were conducted in order to examine the characteristics of the material used in this system.

Key Words : Solid Freeform Fabrication(임의형상제작), Direct Writing(직접주사), Nozzle Dispensing(노즐디스펜싱), Photopolymer(광경화수지)

1. 서 론

* Dep. of Precision Mechanical Eng, Chungbuk National Univ.

Corresponding Author : Mechanical Eng, Chungbuk National Univ.

E-mail : anxanx@chungbuk.ac.kr

** Dep. of Mechanical and Automotive Eng, Andong National Univ.

*** Mechanical Eng, Chungbuk National Univ.

부가가공^[1]에 기반을 둔 임의형상 제작기술(Solid Freeform Fabrication)은 전통적인 가공방식인 절삭가공과 다르게 3차원 구조물을 다수의 얇은 단면으로 나누고 각 단면을 순차적으로 적층하는 방식으로 구조물을 성형한다. 현재 대부분의 임의형상

제작기술은 시제품 제작을 통해 설계 오류를 검사하거나 간단한 파트 제작을 통해 기존 제품의 기능을 보완하는 등의 쾌속조형 기술로 주로 사용되고 있다. 상용화된 쾌속조형 장비는 여러 가지가 있으나 일반적으로 SLA (stereo lithography apparatus), SLS (selective laser sintering), FDM (fused deposition modeling), LOM (laminated object manufacturing) 방식 등이 주로 사용된다^[2].

이러한 기존의 쾌속조형 장비들은 대부분 복잡한 광학계와 레이저 시스템을 사용하기 때문에 장비 자체가 고가이고 각 장비마다 사용 가능한 재료의 범위가 제한적이라는 단점이 있다. 때문에 좀 더 경제적이고 다양한 분야에 응용할 수 있는 새로운 쾌속조형 기술이 요구되었고, 이에 대해 DW (direct writing) 기술을 적용한 새로운 시스템이 고안되었다.

DW 기술은 기존의 패터닝을 위한 마스크 없이 직접 재료를 기판위에 패터닝하는 기술들을 총칭하는 것으로 기존 반도체 공정에서 문제시 되었던 환경오염 문제를 해결하고 재료의 낭비를 최소화할 수 있기 때문에 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한 사용 가능한 재료가 금속, 세라믹, 유전체, 폴리머와 생체재료까지 매우 폭넓기 때문에 다양한 분야에 적용이 가능하다는 장점이 있다^[3].

DW 기술은 패터닝 방법에 따라 여러 가지로 분류되는데, 그 중 주사기 펌프와 노즐을 사용하는 액체흐름 기반 (flow based)의 DW 방식은 기존 쾌속조형 기술 중 FDM방식과 유사하지만 재료를 가열하지 않는다는 점과 토출되는 재료의 부피가 작아 FDM에 비하여 높은 해상도의 결과물을 얻을 수 있다는 특징이 있다. 이에 본 연구에서는 액체흐름 기반의 DW 기술을 적용한 액체재료 직접주사방식의 3차원 구조물 제작 장치를 개발하였고 광경화성 수지를 이용해 구조물을 성형하는 연구를 수행하였다. 특히, 본 논문에서는 기존의 연구 결과를 토대로 3차원 구조물을 성형하기 위해 면을 적층하는 연구가 진행되었고 노즐 위치의 조절에 따른 적층 특성을 알아보기 위한 실험이 수행되었다.

본 연구에서 개발된 시스템은 유체 제어 시스템, 스테이지 제어 시스템, 경화 시스템 등 세 가지로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 3차원 구조물 제작 장치의 개념도이다. 주사기 펌프와 주사기, 테프론 튜브, 노즐 등으로 구성된 유체 제어 시스템은 재료의 토출을 조절한다. 주사기 펌프가 주사기의 플런저를 가압해 설정된 유량에 해당하는 부피의 액체 재료를 토출하며 주사기 내의 재료는 가압이 이루어지면 테프론 튜브를 거쳐 노즐로 토출된다. Fig. 2는 제작된 장치의 사진이다.

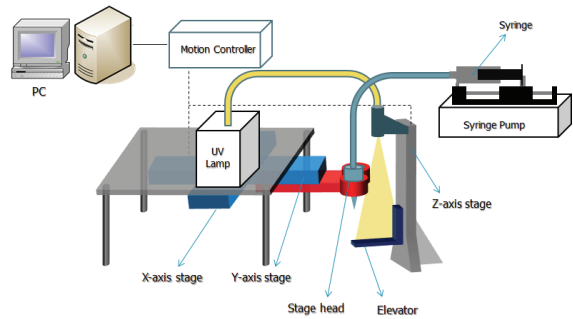


Fig. 1 Schematic drawing of experimental set-up

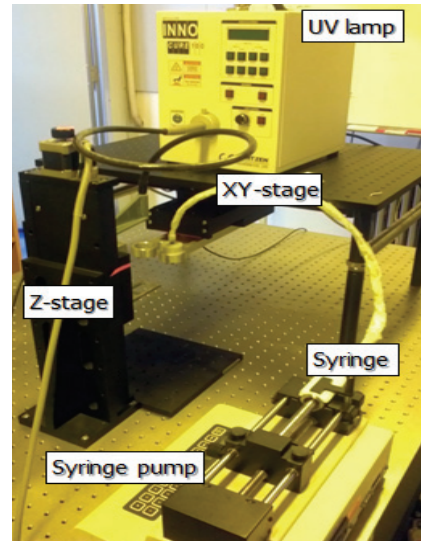


Fig. 2 Photograph of direct writing fabrication system.

2. 실험장치 구성

Table 1 Composition of fabrication apparatus

Component	Company	Model
UV Lamp	Lichtzen	INNO Cure 100
Stage	Lee optics	MTS series
Motion controller	Cheong Won mechatronics	CWM-SEN-303-CB
Syringe Pump	KD Scientific	KDS410
Syringe	Hamilton	1025TLL
	KD Scientific	stainless steel syringe
Nozzle	Musashi Engineering	TPND-25G DPN-30G-1
Material	DMS	Watershed 11120

PC와 연결된 모션 컨트롤러는 x,y,z 3축 스테이지의 제어를 담당하고 LabVIEW 응용 프로그램을 통해 제어된다. 유체 제어 시스템과 스테이지 제어 시스템에 의해 기저판 위에 재료가 토출되면 UV 램프를 통해 경화된다. 실험은 광경화성 수지는 DMS 사의 Watershed 11120를 사용하였고 노즐은 Musashi Engineering 사의 제품을 사용하였다. 주사기는 Hamilton 사의 1025TLL 제품과 KD Scientific 사의 스테인리스 스틸 주사기를 사용하였으며 경화를 담당하는 UV 램프는 Lichtzen 사의 INNO Cure 100 제품을 사용하였다. Table 1은 실험 장치의 구성을 표로 정리한 것이다.

2.1 유체 제어 시스템

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 유체 제어 시스템을 도식적으로 나타낸 것이다. 주사기 펌프는 상용화된 주사기에 대한 정보가 입력되어 있어 사용하고자 하는 주사기를 선택하면 주사기의 내경 및 용량 정보를 기반으로 유량을 계산해 플런저를 가압해준다. 주사기 펌프는 주입, 흡입, 주입 후 흡입, 흡입 후 주입, 연속 모드 등 다양한 토출 모드를 지원하며 일정한 유량으로 연속적인 토출을 하거나 정해진 용량의 유체만을 토출할 수도 있다.

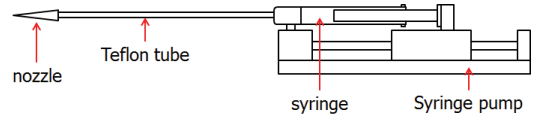


Fig. 3 Schematic drawing of fluid control system

2.2 스테이지 제어 시스템

3차원 구조물의 성형을 위해서는 노즐의 이송과 기저판과의 간격 조절이 중요하다. 따라서 PC와 모션 컨트롤러에 의해 제어되는 3축 정밀 스테이지를 사용하였다. 노즐의 이송을 담당하는 x-y 축 스테이지는 실험 장치가 구성된 광학 테이블로부터 일정한 간격을 두고 설치된 브레드 보드 하단에 설치되었다. 이는 z축 방향의 가동범위를 넓혀 크기가 큰 구조물을 성형하는데 용이하도록 의도한 것이며 기저판 위에 경화된 구조물의 조작이 쉽도록 설계한 것이다. Fig. 4의 LabVIEW 응용 프로그램은 수동 모드와 자동 모드로 스테이지를 구동할 수 있도록 제작되었으며 프로그램 상에서 이송 거리와 속도, 가속도 등의 정보를 알 수 있다.

한편, 노즐의 끝단과 기저판 사이의 간격 조절을 위해서는 경험적인 방법을 사용하였다. 즉, DinoLite 사의 USB연결 현미경인 AM-2011을 사용하여 노즐의 끝단과 기저판 사이의 간격을 관측하면서, 수동 모드를 이용 z-축 스테이지를 이송하여 노즐과 기저판이 간섭을 일으키지 않는 최소한의 거리를 선정하여 영점으로 설정하였다.



Fig. 4 LabVIEW program for stage control

3	0.00	30.00	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	20.00	0.00	10.00	100.00	0	0
1	0.00	0.00	3.00	25.00	250.00	0	0
2	10.00	0.00	0.00	25.00	250.00	0	0
1	0.00	0.00	-3.00	25.00	250.00	0	0
3	0.00	0.50	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	-0.85	0.00	10.00	100.00	0	0
2	-0.85	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
2	0.00	1.20	0.00	10.00	100.00	0	0
3	1.20	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	-1.55	0.00	10.00	100.00	0	0
2	-1.55	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	1.90	0.00	10.00	100.00	0	0
2	1.90	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	-2.25	0.00	10.00	100.00	0	0
3	-2.25	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
1	0.00	2.60	0.00	10.00	100.00	0	0
2	2.60	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
3	0.00	-2.95	0.00	10.00	100.00	0	0
3	-2.95	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
2	0.00	3.30	0.00	10.00	100.00	0	0
2	3.30	0.00	0.00	10.00	100.00	0	0
1	0.00	-3.65	0.00	10.00	100.00	0	0

Fig. 5 Example of coding file for automation mode

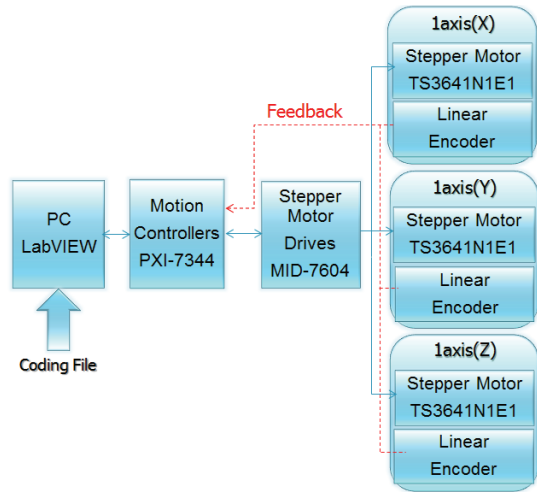


Fig. 6 Three-dimensional nozzle control system configuration

자동모드는 단면 형상을 성형하기 위해 연속적으로 노즐을 이송시킬 때 사용된다. 자동모드는 패턴의 경로가 여러 행에 걸쳐 기록된 코딩파일의 각 행들을 순차적으로 처리하게 되는데 하나의 행에는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 왼쪽에서 2번째 열부터 차례로 x,y,z 축의 이송 거리와 속도, 가속도 등의 정보가 기록되어 있으며 이를 LabVIEW 응용프로그램을 통해 수행시킨다.

LabVIEW 프로그램은 입력된 위치, 속도 및 가속도를 계산하고, 이에 따른 경로정보를 모션 컨트롤러

로 전송한다. 모션 컨트롤러는 경로정보에 따라 모터가 지정된 위치와 속도로 스테이지를 이송하기 위한 스텝모터의 방향 및 출력 생성의 기능을 수행한다. 스텝모터 드라이브는 모션 컨트롤러로부터 전달받은 신호를 스텝모터의 전기적 신호로 증폭시켜 모터를 구동시킨다. 모터는 볼 스크류에 토크를 전달함으로써 3축 스테이지를 구동시킨다. 또한, 3축 스테이지의 구동과 동시에 리니어 엔코더로부터 위치 값을 피드백 받아 정밀한 위치제어를 향상시키게 된다. Fig. 6은 이를 정리한 것이다.

2.2 경화 시스템

토출된 광경화성 수지는 다음 면을 성형하기 전 UV 램프를 통한 경화과정을 거치게 된다. 실험에 사용된 UV 램프는 다양한 파장대역의 자외선을 발생시키며 광 경화성 수지인 Watershed 11120이 가장 활발히 반응하는 355 nm 영역의 자외선 출력이 3,850 mW로 경화에 필요한 충분한 출력을 보여준다. 출력 모드는 수동 모드, 자동 모드, 펄스 모드 등으로 나뉘며 라이트 가이드를 통해 원하는 방향으로 자외선을 조사할 수 있다. 라이트 가이드는 기저판에 수직 방향 상단에 설치되어 토출된 광경화성 수지에 조사된다. 이 경우 주사기 및 테프론 튜브의 광경화성 수지는 경화 시 반사되는 자외선에 영향을 받을 수 있기 때문에 주사기 및 테프론 튜브를 알루미늄 호일로 감싸고 실험을 진행하였다.

3. 노즐 위치 조절에 따른 적층 특성

3.1 개요

부가가공에서의 3차원 구조물 성형은 단면의 순차적인 적층을 통해 이루어지게 된다. 이러한 단면은 선의 중첩방식, 즉 면을 패터닝하는 방식에 따라 표면조도가 달라지는 경향을 보인다는 것을 기존 연구 결과를 통해 알 수 있다^[4]. 따라서 본 연구에서는

기존 연구에서 파악된 상대적으로 높은 표면조도를 얻을 수 있는 방법을 이용하여 면을 성형하였다. 즉, 선과 선의 간격을 $700\mu\text{m}$ 만큼 이격시켜 광경화성 수지가 닿지 않게 각각 선들을 토출한 후 경화시켰다. 그리고 이렇게 경화된 광 경화성수지의 선들 사이로 노즐을 이송시키며 광 경화성 수지를 채워 넣어 면을 성형하였다(Fig. 7).

면의 성형 시 노즐의 토출 경로가 중요한 반면 면의 적층 시에는 노즐과 기저판의 간격 조절이 중요하다. Fig. 7은 노즐과 기저판 사이의 거리(nozzle position), 적층된 최상층 면과 기저판 사이의 거리(thickness) 및 한 층의 두께(thickness of a layer)에 대한 개념을 정리한 것이다. 한 층의 성형이 완료되면 성형된 두께에 해당하는 값만큼 z축 스테이지를 구동해 성형된 면과 노즐의 간격이 초기에 설정된 기저판과 노즐과의 간격과 동일하게 한 후 새로운 면을 성형해야 한다. 성형되는 한 층의 두께보다 z축 스테이지의 구동거리가 작을 경우 적층이 진행될수록 노즐과 성형된 면의 간격이 줄어들게 되고, 결국엔 성형된 면과 노즐의 간섭이 발생하여 연속적인 적층이 불가능하게 된다. 이와 반대로 성형되는 한 면의 두께에 비해 z축 스테이지의 구동거리가 클 경우 적층이 진행되면서 노즐과 성형된 면의 간격이 점점 벌어지게 된다. 이 경우 토출되는 광경화성

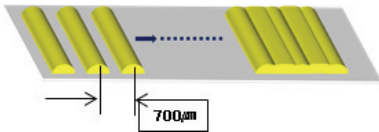


Fig. 7 Schematic drawing of surface fabrication using nozzle dispensing^[4].

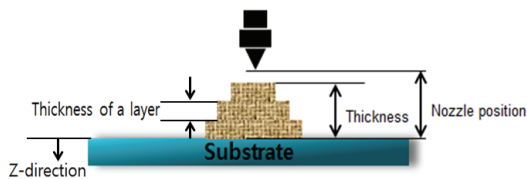


Fig. 8 Schematic drawing of nozzle position and thickness

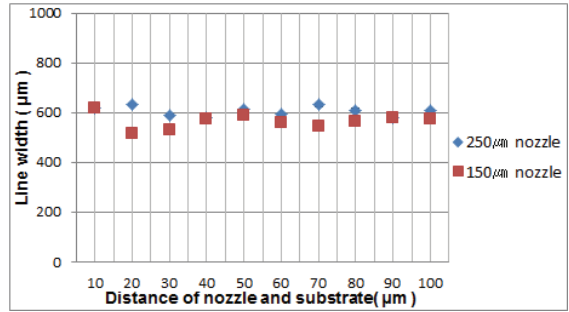


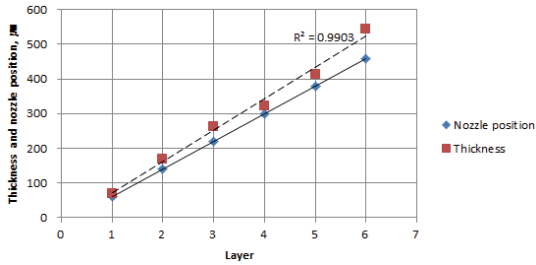
Fig. 9 The graph of Line width of dispensed photopolymer according to changing distance of nozzle and substrate

수지가 연속적인 실선으로 토출되지 않고 점선의 형태로 토출되기 때문에 면을 성형할 수 없게 된다. 따라서 일정한 조건에서 면을 성형하고 성형된 면의 두께를 측정하는 다음 측정된 값에 기준해 z축 스테이지 이송 값을 결정해야 한다.

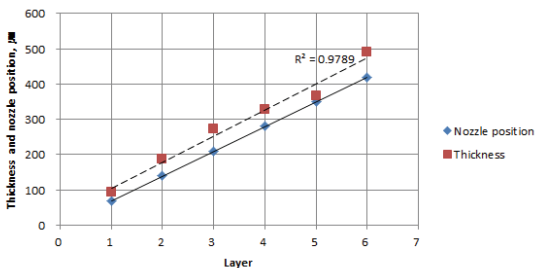
Fig. 9는 내경이 다른 2개의 노즐로 각각 동일한 유량 및 속도에서 기저판과 노즐의 간격만을 변화시켰을 때 선폭을 측정하는 그래프이다. 기존 연구^[5]를 바탕으로 내경 $150\mu\text{m}$ 및 내경 $250\mu\text{m}$ 의 각 노즐에 대해 일정한 선폭을 성형할 수 있는 유량 및 이송속도를 선정하였다. 즉, 내경 $150\mu\text{m}$ 및 $250\mu\text{m}$ 노즐에 대하여 유량 및 이송속도는 1 ml/hr , 10 mm/s 및 0.1 ml/hr , 1 mm/s 이다. 이때 노즐과 기저판 사이의 간격은 $10\sim 100\mu\text{m}$ 사이에서 $10\mu\text{m}$ 씩 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 노즐 내경의 변화에 따른 선폭의 변화는 크지 않다.

3.2 내경 $250\mu\text{m}$ 노즐을 사용한 면의 적층

Fig. 10은 유량 1 ml/hr , 이송속도 10 mm/s 의 조건에서 내경 $250\mu\text{m}$ 의 노즐을 사용해 면을 성형한 후 이를 적층한 결과를 보여주는 그래프이다. 그래프 상에서 실선으로 이어진 마름모 모양의 데이터들은 LabVIEW 응용 프로그램 상에서 입력한 기저판으로부터의 노즐의 위치이며, 사각형 모양의 데이터들은 실제 적층한 재료의 경화 후 높이이다. 사각형 데이터 집합을 통과하는 점선은 오차를 포함하고 있



(a) The case of that nozzle position is not parallel with thickness graph



(a) The case of that nozzle position is parallel with thickness graph

Fig. 10 Comparison of nozzle position and thickness by nozzle of 250 μm

는 각각의 측정 결과들에 대한 경향을 나타내기 위해 최소제곱 회귀분석법에 의한 직선을 접합한 것이다.

Fig. 10 (a)의 경우, 초기 기저판과 노즐의 간격은 60 μm이고 첫 면을 성형한 후 다음 면을 성형할 때마다 스테이지를 80 μm 씩 내려 성형된 면과 노즐의 간격을 조절하였다. Fig. 10 (a)에서는 측정 결과의 경향을 나타내는 점선의 기울기가 노즐의 위치 값인 실선의 기울기보다 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 실제 적층되는 면의 두께보다 z축 스테이지의 이동거리가 작다는 것을 의미하며 이러한 조건에서 적층이 진행되면 성형된 면과 노즐의 간격이 점점 줄어들어 간섭이 발생한다. 이 경우, 연속적인 적층이 불가능하기 때문에 초기 기저판과 노즐의 간격 및 적층 시의 스테이지 이동 값을 조절해 두 직선이 평행하도록 만들어야 한다.

Fig. 10 (b)는 초기 기저판과 노즐의 간격을 70 μm로 설정하고 매 적층 시 스테이지 이동 값을 70 μm

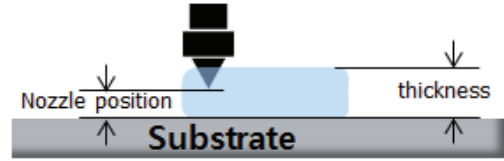


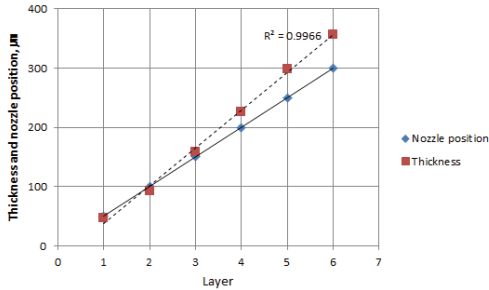
Fig. 11 Nozzle position and thickness of the liquid.

로 조절해서 얻어진 결과를 나타낸 그래프이다. 이 경우 결과의 경향을 나타내는 점선과 노즐의 위치를 나타내는 실선이 평행한 것을 볼 수 있다. 두 선이 평행하다는 것은 실제 적층되는 면의 두께만큼 노즐의 위치가 증가하면서 초기 기저판과 노즐의 간격을 일정하게 유지한다는 것을 뜻하며 이와 같은 조건을 만족해야 연속적인 적층이 가능하다. 따라서 특정 유량 및 이송속도의 조건에서 노즐 위치 조절 값을 확보한 후 적층을 해야 한다.

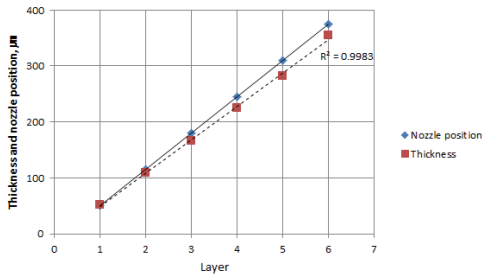
Fig. 10에서 보면 각 층에서 노즐의 위치가 적층된 면의 두께보다 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 노즐의 내경이 큰 경우 Fig. 11과 같이 토출되는 유체의 높이가 노즐과 기저판 사이의 간격보다 높기 때문이다. 한편, 노즐의 내경에 따른 토출되는 유체의 높이와의 관계는 유체의 점성에 따라 달라질 것으로 판단된다.

3.3 내경 150μm 노즐을 사용한 면의 적층

주사기 펌프와 노즐을 사용하는 유체제어 시스템의 경우 주사기 펌프와 노즐 간의 응답 시간이 길어 노즐 끝단에 액적이 맺히는 현상이 발생할 수밖에 없다. 이로 인해 재료를 토출하는 시작점에서의 선폭 및 두께가 상대적으로 커지게 된다. 따라서 기저판 및 성형된 면과 노즐 사이의 간격이 의도한 값보다 작아지게 되며 이러한 현상들이 중첩되면 간섭이 발생하게 된다. 따라서 노즐 끝에 액적이 맺히는 현상을 완화해야 한다. 이를 위해 작은 내경을 갖는 노즐을 사용하고 유량을 작게 설정해 노즐 끝에서 맺히는 액적의 크기를 줄여야 한다. 하지만 이 경우 노즐의 이송속도를 너무 크게 하면 연속된 선의 성형이 어려워진다. 따라서 노즐의 이송속도를 큰 내



(a) The case of that the slope of thickness is bigger than the slope of nozzle position graph



(b) The case of that the slope of thickness is smaller than the slope of nozzle position graph

Fig. 12 Comparison of nozzle position and thickness by nozzle of 150 μm

경의 노즐 대비 작게 하여 토출 시작 부분에서의 잉여 수지를 최소화한 다음 적층 실험을 진행하였다.

Fig. 12는 유량 0.1 ml/hr, 이송속도 1 mm/s 조건에서 내경 150 μm의 노즐을 사용해 면을 성형한 후, 이를 적층한 결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 11 (a)는 초기 기저판과 노즐의 간격을 50 μm로 설정하고 적층이 될 때마다 50 μm씩 노즐 위치를 조절하며 성형된 결과이다. 이 경우 노즐 위치를 나타내는 실선의 기울기보다 측정된 두께에 대한 경향을 나타내는 점선의 기울기가 크기 때문에 Fig. 11 (a)와 같이 적층이 진행될수록 노즐과 성형된 면과의 간격이 줄어들어 간섭이 발생하게 된다.

Fig. 12 (b)는 초기 기저판과 노즐 간격을 50 μm로 설정하고 매 적층 시의 노즐 위치 증가 값을 65 μm로 조절한 후 실험을 진행하여 얻은 그래프이다. 이

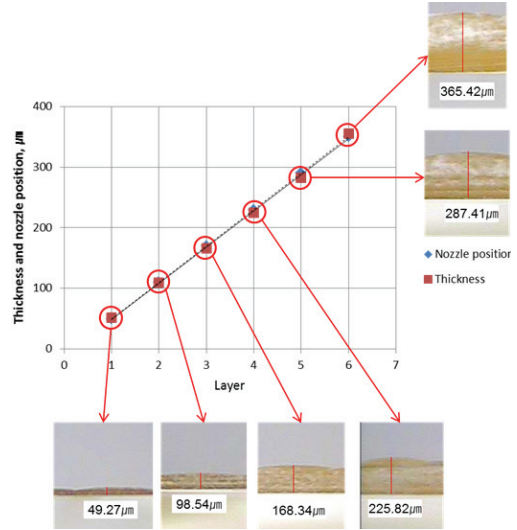


Fig. 12 The lamination results that the nozzle position graph is parallel with thickness graph

경우는 Fig. 12 (a)와 반대로 실선의 기울기보다 점선의 기울기가 작게 나타난다. 따라서 적층이 진행될수록 성형된 면과 노즐의 간격이 점점 벌어지게 되며 연속적인 실선으로 토출되지 못하기 때문에 면을 성형할 수 없다. 연속적인 적층이 가능하려면 노즐 위치 증가 값을 조절해 두 직선이 평행하도록 해야한다.

Fig. 13은 Fig. 12와 동일한 조건에서 노즐 위치 증가 값을 60 μm로 설정한 후 실험을 진행한 결과와 실제 단면 사진을 나타낸 것이다. 이 경우 Fig. 12의 결과와 다르게 두 직선이 평행하며 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 면의 적층을 위해 이상적인 조건을 만족한 결과로써 초기 기저판과 노즐의 간격이 적층이 진행되는 동안 일정한 값으로 유지되었음을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 3차원 구조물을 성형하기 위해 주사기 펌프와 노즐을 이용한 액체 재료 직접주사방식의 새로운 임의형상제작 시스템을 개발하였다. 또한 구조물 성형을 위한 적층 특성을 알아보기

위해 실험을 진행하였으며 이를 통해 단면의 적층 시 특정 조건에 맞는 노즐 위치 값의 조절에 대한 고려가 필요하다는 결론을 얻었다. 즉, 면의 적층이 진행되면서 간섭이 일어난다면 노즐 위치 값을 증가시키고 연속적인 선이 아닌 점선 형태로 토출된다면 노즐 위치 값을 감소시켜야 연속적인 면의 적층이 가능하다.

후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 결과임(2010-0023501)

참고문헌

1. ASTM F2792 - 10e1, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
2. W. H. Lee, "3D Solid freeform fabrication based powder using inkjet technology", department of intelligent mechanical engineering Graduate School, pusan national university, Ph. D. Dissertation, 2007.
3. K. K. B. Hon, L. Li and I.M. Hutchings, "Direct writing technology-Advances and developments," CIRP Annals Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 601-620, 2008.
4. I. H. Lee, H. J. Jung, S. H. Jang, H. C. Kim, T. J. Ko, "Fabrication Characteristics of Photopolymer According to the Dispensing Paths", Proceeding of the KSMPE Spring Conference, pp.112, 2012.
5. H. J. Jung, S. H. Jang, I. H. Lee, "Surface Roughness Variation for the Dispensing Pattern in Direct Writing System", Journal of Industrial Science and Technology Institute, Vol. 26, No. 2, pp. 95-99, December 2012