

# 용융잉크 적층공정을 이용한 내부채색형상을 포함한 광조형물 제작에 관한 연구

## A Study on Fabrication of Internally Colored Shape in Stereolithography Parts using Molten Ink Deposition Process

박종철<sup>1</sup>, 박석희<sup>1</sup>, 강상일<sup>2</sup>, 양동열<sup>1,✉</sup>  
Jong Cheol Park<sup>1</sup>, Suk Hee Park<sup>1</sup>, Sang Il Kang<sup>2</sup> and Dong-Yol Yang<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science Technology)

<sup>2</sup> 쉐슬리시스 (Solisys)

✉ Corresponding author: dyyang@kaist.ac.kr, Tel: 042-350-3214

Manuscript received: 2010.2.16 / Accepted: 2010.4.1

*Rapid Prototypes with internally colored objects are convenient by visualizing. A rapid prototyping method has been developed to fabricate mono-colored or multi-colored objects. In this work, a new process was proposed that can fabricate internally visible colored 3D objects in stereolithography parts. The process consists of projection stereolithography process using transparent photocurable resin for outer shapes and molten ink deposition process using molten solid ink for internal shapes. In molten ink deposition process, molten solid ink could be deposited uniformly in a designed pattern. To make molten solid ink uniform over a designed region, parametric study through a patterning solid ink was performed. By laminating resin and solid ink in sequence, the process can make colored 3D objects in StereoLithography(SL) parts. The practicality and effectiveness of the proposed process were verified through fabrication of colored basic 3D objects in SL parts.*

Key Words: Rapid Prototyping (쾌속조형), Internal Object (내부형상), Color (색), Stereolithography (광조형)

### 1. 서론

쾌속조형기술(Rapid Prototyping)을 이용해 임의 형상의 제작시간 단축이 가능하다. 빠르게 급변하는 산업 사회에서 제작시간을 단축시킬 수 있는 쾌속조형기술의 중요성은 부각되고 있으며, 매년 세계적으로 시장이 확대되고 있으며, 기계, 건축, 의료분야를 비롯한 산업 디자인, 예술, 교육 등의 다양한 분야에 적용 가능하다.<sup>1,2</sup>

쾌속조형기술의 기본적인 공정순서는 다음과 같다. 3 차원 스캐너로 형상 데이터를 취득하거나, 3 차원 형상 데이터를 모델링하여 CAD 데이터를

제작하고, 형상데이터를 스테레오리소그래피 (Stereolithography, STL)로 변환한다. 스테레오리소그래피를 전용 소프트웨어에 입력하여 적층방향으로 2 차원 단면 슬라이싱한다. 2 차원 단면 데이터를 쾌속조형장치에 입력하여 광경화수지, 종이, 금속, 폼, 파우더 등을 이용하여 2 차원의 단층을 가공하고, 이를 연속적으로 적층하여 3 차원 형상을 제작한다. 쾌속조형공정은 종래의 기술로 제작할 수 없었던 복잡한 형상을 빠르게 제작 가능하다.<sup>3</sup>

초기의 쾌속조형기술은 단색, 단일재료의 3 차원 조형물만이 제작가능해 조형물이 가지는 색정보가 제한적이었으며 정보전달에 한계가 있었다.<sup>4</sup>

이를 개선하기 위한 다색 조형물 제작이 가능한 다양한 공정들이 개발되었다. 프린터헤드를 이용해 파우더 재료에 잉크분사, 이중색의 재료로 각각의 형상을 제작하여 조립,<sup>5,6</sup> 염료를 혼합한 광경화수지 경화,<sup>7</sup> 광반응성 물질(Photoresponsive agent)을 혼합한 광경화수지에 레이저의 노광시간(Curing time)제어를 통한 색농도 조절<sup>8</sup> 등의 공정을 적용해 다색 조형물 제작이 가능하였다. 특히 광경화수지를 이용한 두 공정은 투명한 광경화수지로 3차원 조형물을 제작하고 조형물의 내부에 다른 형상제작이 가능하였으며 이를 통해 외부의 조형물을 투영하여 내부 조형물을 관찰할 수 있게 하였다. 기존에 제작할 수 없었던 내부형상을 제작하여 형상 간의 상대적인 위치와 크기에 대한 정보를 동시에 사용자에게 전달할 수 있게 되었다.

내부형상의 제작이 가능한 두 공정은 내부형상을 포함한 광조형물을 제작하기 위해 광조형법(SLA, StereoLithography Apparatus)을 이용하였다. 첫째는 외부형상의 재료로 투명 광경화수지를 사용하였으며 내부형상재료는 광경화수지에 염료를 혼합하였다. 투명 광경화수지를 코팅한 후, 내부형상부분을 제외한 나머지 부분에 노광하여 경화하였다. 미경화된 영역의 광경화수지는 액상상태이며 이를 제거하였다. 제거된 영역에 염료를 혼합한 광경화수지를 코팅하고 경화하였다. 내부형상으로 다른 색을 추가하기 위해서 동일한 과정을 반복하였다. 이 공정을 통해 다색 내부형상을 포함한 광조형물을 제작하였다.<sup>7</sup> 이 공정은 염료의 색에 따라 다양한 색의 형상이 제작가능하나, 구현하기 위한 색이 많을수록 광경화수지를 코팅하고, 미경화된 수지를 제거하는 공정의 반복횟수가 늘어난다. 이를 통해 제작시간이 길어질 것을 예측할 수 있다.

둘째는 외부형상, 내부형상의 재료로 광반응성 수지를 혼합한 광경화수지를 사용하였다. 광반응성 수지는 광원의 노광시간에 따라 색의 농도를 조절하여 내부형상을 제작하였다. 외부형상은 색의 농도를 흐려 투명한 광경화수지로 제작하고, 내부형상은 색의 농도를 진하게 하여 내부 채색된 형상을 제작하였다.<sup>8</sup> 또한, 광반응성 수지는 파장영역이 다른 광원에 반응하여 색이 나타난다. 현재로서 광반응성 재료의 색과 광원의 수가 한정적이어서 다색표현에 제한이 있다.

본 연구에서는 다색의 내부채색형상을 포함한 광조형물을 제작하기 위한 새로운 개념의 공정을

제안하고 그 공정의 유용성을 확인하고자 한다. 제안된 공정은 별도의 색재료를 사용하는 채색기구를 사용함으로써 채색기능을 분리하였다. 기존의 공정들과 달리 광경화수지에 채색기능을 부여하기 위한 첨가제를 넣는 전처리과정 없이 다색의 내부형상 제작이 가능하다. 또한, 광경화수지의 공급과 경화가 같은 수조(vat)에서 발생하는 기존의 광조형법과 달리 수지공급부(Resin vat)에서 광경화수지를 공급하여 형상이 제작되는 스테이지(Stage)에서 경화시킨다. 이는 광경화수지의 공급과 경화가 발생하는 위치를 분리한 것으로, 스테이지에서 경화된 광경화수지 표면에 색재료를 직접 적층하여 액상의 광경화수지를 제거하는 과정을 줄였다. 또한 제안된 공정은 기능분리한 채색기구의 기술 개발 정도에 따라 전색(Full color)의 내부채색형상 제작이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 외부형상제작을 위한 투영광조형공정(Projection Stereolithography Process, PSP)의 광경화수지의 노광시간을 도출하였고, 내부형상제작을 위한 용융잉크 적층공정(Molten Ink Deposition Process, MIDP)의 용융잉크의 용착특성을 분석하여 예제형상제작을 위한 공정조건을 도출하였다. 이를 통해 내부채색형상을 포함한 광조형물의 예제형상을 제작하여 공정의 유용성을 확인하였다.

2. 내부채색형상을 포함한 광조형물 제작

2.1 내부채색형상을 포함한 광조형물 개념

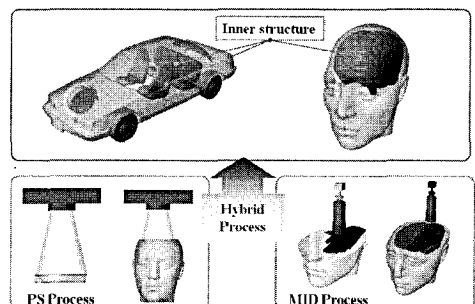


Fig. 1 Concept of visible internal shapes using Projection Stereolithography & Molten Ink Deposition process

본 공정은 액상의 광경화수지에 광원을 노광하여 투영광조형공정과 용융잉크 적층공정을 적용하여 교대적층하였다. Fig. 1에서 외부형상을 제작하는

투영광조형공정(Projection Stereolithography Process, PSP)은 광조형물의 한 층을 먼 단위로 노광하여 점(Point)노광하는 기존의 광조형법보다 빠르게 형상을 제작할 수 있다. 또한, 외부형상을 수직상부 방향으로 적층하여 용융잉크 적층 공정(Molten Ink Deposition Process, MIDP)의 노즐이 Fig. 1 과 같이 내부채색형상 적층에 용이하도록 하였다. 용융고체잉크는 상온의 광경화수지 표면에서 약 3 초 이내로 자연 고상화하여 별도의 추가공정없이 빠르게 제작 가능하다.

**2.2 공정 장치의 구성요소**

**2.2.1 외부형상의 광조형 모듈**

Fig. 2 는 장치 개념도이다. 조형물은 z 축 스테이지에서 제작되며 z 축 스테이지(z axis stage)를 중심으로 수직상부에는 광경화 모듈(Light exposing module), 2 축 제어 시스템(2 axis control system)과 분사노즐(Extrusion nozzle)로 구성된 용융잉크 적층모듈(molten ink deposition module)을 배치하였다.

외부형상을 적층하기 위한 광경화수지는 수지이송기판(Resin transfer plate)이 수지공급부(Resin vat)의 수직상부를 이동하면서 수지공급부의 물리가 회전하며 수지이송기판으로 전사된다. 광경화수지를 전사한 수지이송기판은 z 스테이지로 이동한다. 그리고 수지이송기판에 노광하면 광원은 수지이송기판을 투과하여 광경화수지를 경화시킨다. 이에 수지이송기판은 투과율이 높고, 경화가 완료된 후, 조형물에서 탈착해야 하므로 접착력이 낮아야 한다. 이 두 조건을 만족하는 재료로 polycarbonate 를 사용하였다. 광원은 Texas Instruments 사의 DMD(Digital Micromirror Display) Chip 을 장착한 Dell 사의 2400 MP 프로젝터(3000 ANSI Lumens, 1024x768 resolution)를 사용하였으며, 한 픽셀은

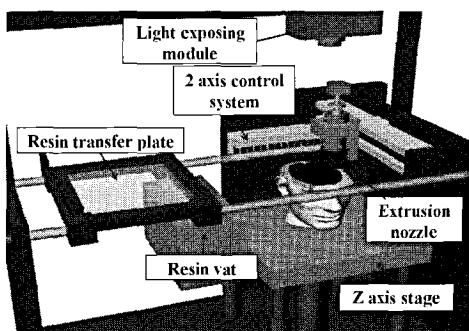


Fig. 2 Schematics of total hardware of proposed process

100 μm 의 정사각형이다. 수지는 Solisys 사에서 공급하는 아크릴계열의 광경화수지를 사용하였다.

**2.2.2 내부채색형상의 용융잉크 적층 모듈**

용융잉크 적층모듈은 용융고체잉크를 분사하는 분사노즐(Extrusion nozzle), 고체잉크를 용융하는 가열코일, 내부채색형상의 슬라이딩 좌표데이터에 따라 이동하는 2 축 제어 시스템(2 axis control system)으로 구성되어 있다. 분사노즐의 시린지(Syringe)에 온도제어 가능한 가열코일을 부착하여 시린지 내부의 고체잉크를 용융하였다. 시린지 내부의 피스톤은 시린지 중심 축을 따라 수직으로 이동하여 용융 고체잉크를 분사한다. 또한, 2 축 제어 시스템에 분사노즐을 장착하여 z 축 스테이지에서 제작되고 있는 광조형물의 표면에 내부채색형상을 용착할 수 있도록 설계하였다.

**3. 내부채색형상 제작을 위한 공정변수분석**

**3.1 광조형공정의 노광시간(Curing time) 분석**

광경화공정에서 외부형상 제작에 적합한 노광시간 조건의 도출이 필요하다. Fig. 3 에서 각 200 μm 두께의 코팅된 광경화수지에 일정시간 동안 노광하여 10 회 연속으로 적층하였다.

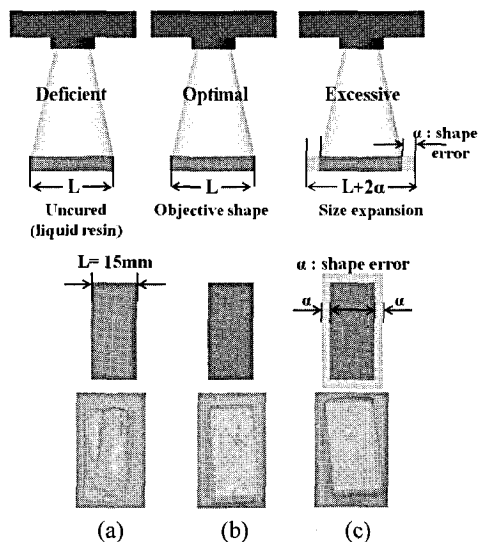


Fig. 3 Case of curing types depending on curing time (a) Deficient curing time (b) Optimal curing time (c) Excessive curing time

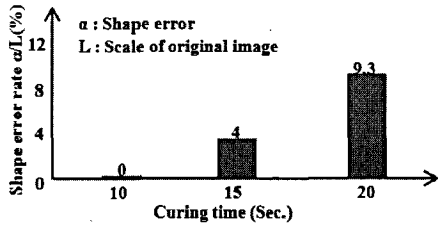


Fig. 4 Shape error rate of thickness 200 μm depending on curing time

노광시간에 따라 광경화수지의 경화되는 경향이 Fig. 3 과 같이 나타났다. 노광시간이 짧을 경우, 광경화수지가 미경화되었으며 미경화된 광경화수지는 Fig. 3(a)과 같이 각 층(layer)끼리 접합되지 않았다. 노광시간이 필요이상으로 길 경우, Fig. 3(c)와 같이 외부형상 데이터보다 넓은 면적이 경화되어 형상오차(shape error)가 발생하며 경화시간이 증가함에 따라 Fig. 4 와 같은 형상오차가 증가하는 경향을 확인하였다. 광경화수지가 완전 경화되고, 형상오차가 발생하지 않는 노광시간의 도출이 필요하다.

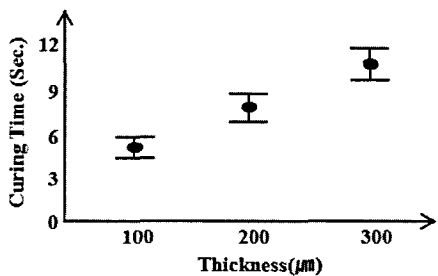


Fig. 5 Graph of curing time of with changing thickness of photoresponsive resin

광경화수지의 단위 적층두께에 따른 노광시간을 도출하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 5 와 같이 적층두께가 두꺼울수록 노광시간이 길어지는 경향을 나타내며 각 조건에서 약간의 편차가 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 실험에서 적층두께가 가장 얇아 제작형상의 정밀도를 높일 수 있는 100 μm 를 선택하였으며 노광시간을 6 초로 도출하였다.

**3.2 용융잉크 적층공정의 온도조건 특성분석**

용융잉크 적층공정은 Xerox 사의 Cyan (108R00669)과 Magenta(108R00670) 고체잉크를 사

용하였다. 용융잉크 적층공정에서 용융된 고체잉크를 정상상태(Steady-state)로 분사하기 위해서는 완전히 용융되어 상변화가 없는 액상상태가 되어야 한다. 이를 확인하기 위해서 Setaram 사의 Differential Scanning Calorimetry(DSC) 장비로 상변화에 필요한 에너지를 측정하였다. Fig. 6 은 Cyan (108R00669)의 온도 변화에 따른 에너지 흡열그래프이며 Magenta(108R00670)의 경우와 동일하였다. 약 40℃부근에서 흡열을 시작하여 110℃ 부근에서 멈춘다. 이를 통해 40 ℃~110 ℃에서 상변화를 위한 에너지를 흡수하고, 110 ℃ 부근에서 상변화가 완료됨을 간접적으로 확인할 수 있다.

용융잉크 적층공정의 노즐에서 용융상태의 고체잉크를 안정적으로 분사하기에 적합한 점도 도출이 필요하다. 용융점도를 측정하기 위해 Rheometric Scientific 사의 ARES (Advanced Rheometric Expansion System) 장비를 사용하여 Xerox 사의 Cyan(108R00669)와 Magenta(108R00670)의 용융점도를 측정하였으며 두 재료의 용융점도는 동일한 것을 확인할 수 있었다.

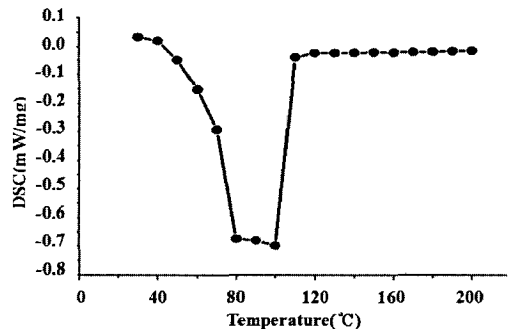


Fig. 6 Endothermic reaction graph of solid ink, Cyan(108R00669) for phase change from solid to liquid

Fig. 7 은 온도에 따른 Cyan(108R00669)의 용융점도를 측정한 그래프이다. 전단율(Shear rate)은 100 s<sup>-1</sup> 에서 측정하였다. 약 110 ℃를 기준으로 물에 가까운 저점도가 되어 노즐에서 분사가 용이할 것을 예측할 수 있었다. 또한, 고상화시간이 짧아 경화 수지표면에 용착되면 다음 공정이 진행되기 전에 고체잉크가 완전 고상화되어 잉크의 번짐이나 퍼짐이 없었고, 광경화수지와 접착성이 좋아 내부채색형상을 제작하기 위한 본 연구의 용융잉크 적층공정에 적합하였다.

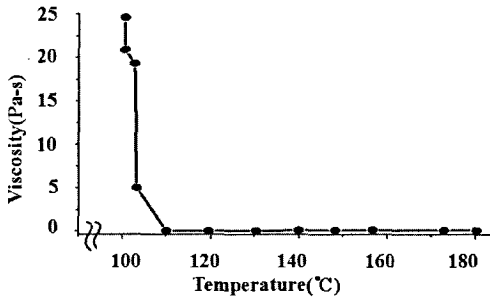


Fig. 7 Graph of molten magenta solid ink, Cyan (108R00669) viscosity with changing temperature

**3.3 용융잉크 적층공정의 용착특성 분석**

용착특성 분석을 위한 실험은 Fig. 8 과 같이 용융잉크 적층공정의 분사노즐을 경화된 수지표면에 수직으로 위치해 V(Velocity)로 이동하며 용융고체잉크를 분사하였다. Fig. 8 의 Q(Flow rate)는 분사되는 용융고체잉크의 단위 시간당 부피, H(Gap)는 노즐의 팁과 경화된 수지의 표면 사이의 간격이다.

Fig. 7 에서 110 °C 이상에서 용융점도가 아주 낮기 때문에 H 의 간격이 클 경우, 용융고체잉크가 분사되면서 표면장력에 의해 노즐의 팁에 맺히는 현상이 발생하였다. 또한 H 의 간격이 작을 경우, 용착고체잉크의 두께가 H 의 가감에 따르는 경향을 나타내는데 이로 인해 적층두께가 필요이상으로 얇아지는 경향을 확인하였다. 본 실험에서는 적절한 H 로 100 μm 를 설정하였다. 노즐 팁의 내경은 340 μm, 외경은 640 μm 을 사용하였다.

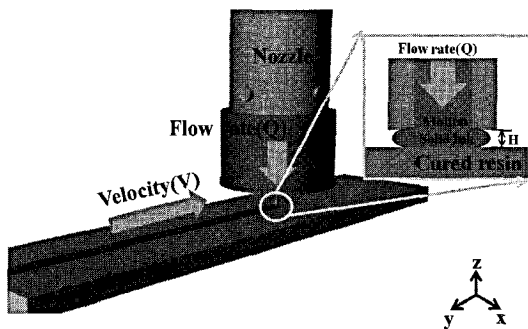


Fig. 8 Schematic of molten solid ink extrusion on cured resin using nozzle

내부채색형상 제작을 위한 용융잉크 적층공정의 분사노즐을 이용해 용융잉크의 용착특성을 파

악하기 위해 다양한 공정조건에서 용융고체잉크를 분사하였으며, Fig. 9 와 같은 경향을 확인할 수 있었다.

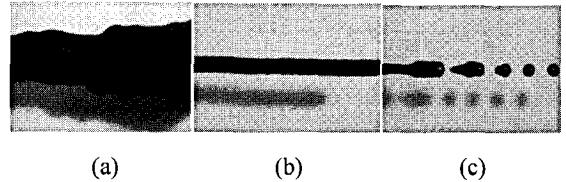


Fig. 9 Patterning types of deposited solid ink using nozzle (a) Overflowed line ( $Q = 0.471 \text{ mm}^3/\text{s}$ ,  $V = 10\text{mm/s}$ ) (b) Uniform line ( $Q = 0.314 \text{ mm}^3/\text{s}$ ,  $V = 20\text{mm/s}$ ) (c) Discontinuous line ( $Q = 0.314 \text{ mm}^3/\text{s}$ ,  $V = 30\text{mm/s}$ )

**3.4 내부채색형상 제작을 위한 용착조건도출**

Fig. 10(a)는 경화된 광경화수지와 용융고체잉크가 수지표면에 균일하게 용착되어 연속적으로 적층된 개념도이며 Fig. 10(b)는 균일하게 용착된 고체잉크의 단면을 절단한 사진이다. Fig. 10(b)에서 용착잉크의 두께(Thickness)와 폭(Width)을 정의하였다.

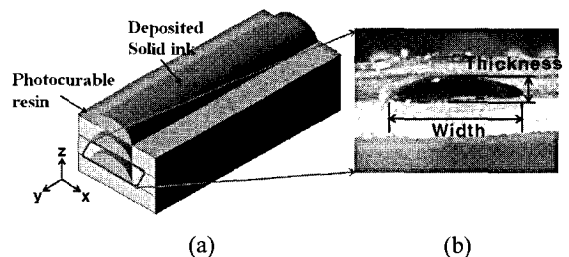


Fig. 10 (a) Schematic of sequences of cured photocurable resin layers and solid ink layers (b) Picture of cured photocurable resin and solid ink

내부채색형상을 제작하기 위해서는 Fig. 10(a)와 같이 균일하게 적층해야 하므로 균일하게 용착되는 영역을 Fig. 11 과 같이 도출하였다.

Fig. 11 의 실험결과에서 속도(V)가 느리고 유량(Q)가 클수록 용융잉크가 과도분사되고, V 가 빠르고 Q 가 적을수록 불연속분사되는 경향을 확인하였다. 이를 통해 영역을 구분하여 균일하게 용착되는 영역을 도출하였다. 균일영역 내에서는 공정조건에 따라 선폭의 조절이 가능하였다.

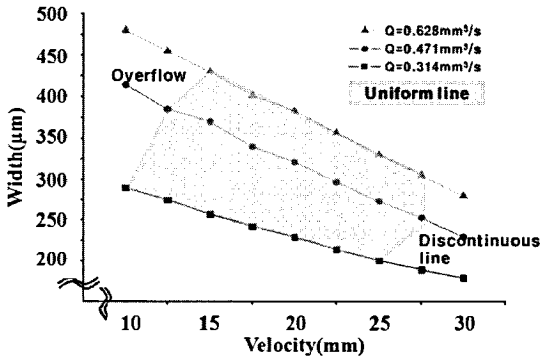


Fig. 11 Graph of width of deposited solid ink with changing velocity of 2 axis control system and flow rate of solid ink

내부채색형상을 제작하기 위해서는 용착된 고체잉크가 광경화수지의 두께에 근사해야 한다. 이는 용착고체잉크의 두께가 광경화수지보다 두꺼울 경우, 각 층의 용착고체잉크 간에 간섭이 생겨 내부채색형상에 왜곡이 발생하고, 용착고체잉크의 두께가 광경화수지보다 작을 경우, 적층방향으로 연속으로 용착된 고체잉크 간에 광경화수지가 채워져 내부채색형상이 불연속적으로 적층되어 내부채색형상이 왜곡되어 보일 것임을 예측할 수 있다.

광경화공정의 노광시간 도출 실험에서 광경화수지의 단위 적층두께를 100 μm로 설정하였다. 용착고체잉크의 목표 적층두께를 100 μm로 설정하여 용융잉크 적층공정의 공정조건들을 도출하였다.

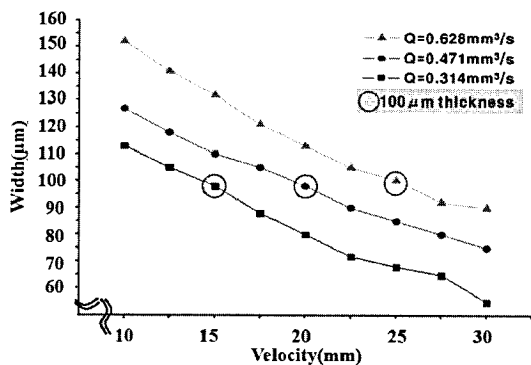


Fig. 12 Graph of thickness of deposited solid ink with changing velocity of 2 axis control system and flow volume using nozzle

Fig. 12는 속도와 유량에 따른 용착고체잉크의 두께에 대한 그래프이다. Fig. 11의 그래프에서 도

출된 균일한 용착영역에서 100 μm 조건을 만족하는 공정조건들을 도출하였다. 이 중에서 속도가 가장 빠른 공정조건인 V=25 mm/s, Q=0.628 mm<sup>3</sup>/s을 도출하였으며 이를 적용하여 예제형상을 제작하였다.

#### 4. 내부채색형상을 포함한 광조형물 제작

도출된 실험조건을 적용하여 내부채색형상을 포함한 광조형물의 예제를 제작하였다. 예제형상은 외부형상인 원기둥 내부의 원기둥 외부형상, [rz(mm) : 40, 10], 내부채색형상[rz(mm) : 15, 6], 직육면체 내부의 직육면체 외부형상 [xyz(mm) : 30, 30, 10], 내부채색형상[xyz(mm) : 10, 10, 5]를 제작하였다. Fig. 13, 14는 CAD형상과 완성된 예제형상의 사진이다.

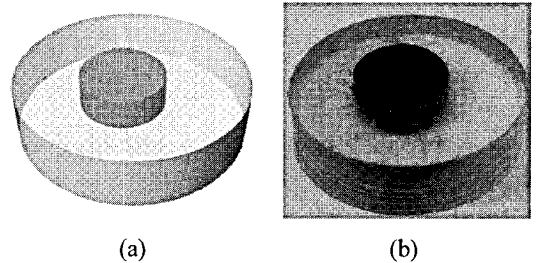


Fig. 13 Figure of visible internal shapes of (a) CAD data (b) Prototype of Cylinder

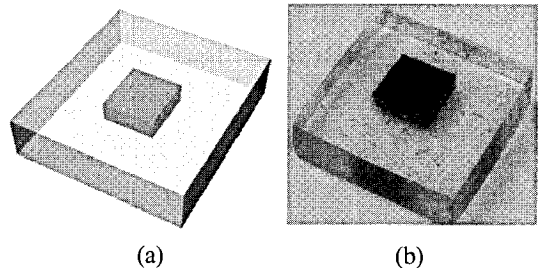


Fig. 14 Figure of visible internal shapes (a) CAD data (b)Prototype of Hexahedron

완성된 3 차원 내부 채색된 형상을 포함한 광조형물의 외부형상부분에 약간의 기포를 확인할 수 있었다. 하지만, 외부형상을 투과해 내부채색형상을 관찰할 수 있었다. 발생한 기포는 수지공급부의 롤러를 통해 수지이송기관에 광경화수지를 전사하는 과정에서 발생한 것으로 판단되며 향후

플러의 속도제어, 수지이송기판의 이동속도 제어, 광경화수지의 점도제어 등의 공정개선을 통해 제거할 수 있을 것으로 보인다.

## 5. 결론

본 연구에서는 내부 채색된 형상을 포함한 광조형물을 제작하기 위한 새로운 공정을 제안하였다. 제안된 공정은 투영광조형공정과 용융잉크 적층공정으로 구성되어 있다. 투영광조형공정은 투명한 광경화수지를 노광하여 외부형상을 제작하고, 용융잉크 적층공정은 노즐에서 분사된 용융고체잉크를 자연경화시켜 내부채색형상을 제작하였다. 각각의 공정을 순차적으로 수행하여 내/외부의 형상을 교대적층하였다.

실험에서

1) 투영광조형공정에서 예제형상제작에 적용할 두께인 100  $\mu\text{m}$  적층에 적합한 노광시간 도출

2) 용융잉크 적층공정의 용착특성 분석을 통한 용착 잉크의 선폭, 두께 제어와 예제형상제작에 적용할 공정조건 도출

3) 1)과 2)에서 도출한 공정조건을 적용하여 기본적인 예제형상 제작을 수행하였으며 이로서 본 연구에서 제안한 내부 채색된 형상을 포함한 광조형물 제작공정의 유용성을 확인하였다.

## 참고문헌

1. Yang, D. Y. and Sohn, H. K., "Recent state of rapid prototyping technique for rapid product development," J. of KSPE, Vol. 17, No. 10, pp. 5-10, 2000.
2. Jacobs, P. F., "Stereolithography and other RP&M technologies," American Society of Mechanical Engineers Press, 1996.
3. Ahn, D. G., "Investigation into development of variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam," Mechanical Engineering, Ph. D. Thesis, KAIST, 2002.
4. Wang, D. X., Guo, D. M., Jia, Z. Y. and Leng, H. W., "Slicing of CAD models in color STL format," Computers in Industry, Vol. 57, No. 1, pp. 3-10, 2006.
5. Gibson, I. and Ling, W. M., "Color RP," Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 212-216, 2001.
6. Wang, D. X., Leng, H. W. and Chen, S., "Recent advances in color rapid prototyping," International Journal of Precision Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 133-138, 2007.
7. Im, Y. G., Chung, S. I., Son, J. H., Jung, Y. D., Jo, J.G. and Jeong, H. D., "Functional prototype development : Inner visible multi-color prototype fabrication process using stereolithography," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 130-131, pp. 372-377, 2002.
8. Christian, K., Michael, R., Georgios, L., Gerhard, U., Arne, W. and Werner, M., "Colours stereolithography for planning comple maxillofacial tumour surgery," Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, Vol. 26, No. 6, pp. 360-362, 1998.