

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2017.41.6.477>ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)**개방형 FDM 3D 프린터의 출력물 정밀도를 위한 히팅 시스템 개발**박상호^{*†} · 이주형^{*} · 김정민^{*}

* 충남대학교 기계공학부

Development of Heating System for Ensuring Accuracy of Output for Open 3D PrinterSangho Park^{*†}, Joo Hyeong Lee^{*} and Jung Min Kim^{*}

* School of Mechanical Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received August 30, 2016 ; Revised October 21, 2016 ; Accepted October 25, 2016)

Key Words: 3D Printer(3D 프린터), FDM(융용 수지 압출 적층 조형), Heating System(히팅 시스템), Accuracy(정밀도), FEM(유한요소법)

초록: FDM 방식은 열가소성 필라멘트 가열을 이용하고 압출하여 적층하는 방식이다. FDM 프린팅 공정은 정밀도와 표면 거칠기가 고르지 않지만, 비용과 출력시간에 많은 이점을 갖는다. 최근 몇 년 동안, FDM 프린팅 공정의 정확성을 향상시키는 연구가 많이 진행되었으나, 개방형 3D 프린터의 정밀도 향상에 관한 연구는 미진한 실정이다. 본 연구에서는 개방형의 베드 개선을 통해 상기 출력부의 온도 차이를 감소시키는 방법을 제안한다. 전통적으로, 폐쇄된 챔버 내에서 FDM프린팅 공정은 수행된다. 그러나, 이 연구에서는 온도차이를 줄이기 위해 개방형 히팅 시스템을 사용하였다. FDM 방식의 프린팅 공정을 FEM 시뮬레이션을 이용하여 수행하였으며, 실험을 통하여 결론을 도출하였다.

Abstract: When using the FDM to create a 3D object, a thermoplastic filament is heated to its melting point and then extruded layer by layer. Although the FDM printing process has many advantages, its accuracy, and surface finish are not satisfactory. In recent years, much research has been devoted to improving the accuracy of the FDM printing process. The temperature difference between the nozzle and the interior of the chamber of a 3D printer is one of the important parameters affecting the printing process. In this study, we propose a methodology to reduce this temperature difference through design improvement. In addition, we elucidate how this design improvement affects product quality. The FDM printing process is conventionally carried out in a closed chamber. However, in this study, an open heating system is used to reduce the temperature. The FDM printing processes were simulated using FEM analysis.

- 기호설명 -

 δ : 곡률변형(mm)

k : 적층 수

l : 출력물 크기(mm)

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

3차원 적층 가공 기술(Additive Manufacturing,

AM)은 정밀도의 향상과 가격이 저렴해 짐에 따라 산업 현장은 물론 개인 사용자에게도 보급이 가속화 되고 있으며 이에 따른 시장의 규모가 점차 커지고 있다. 3차원 적층 가공 기술은 종래의 출력 기술과는 달리 제작하려는 물체의 Z방향으로 얇게 단면을 나누고 이 단면을 한층 한층 입체적으로 출력이 가능하며, 3D CAD 도면이 있다면 복잡하고 다양한 물체를 손쉽게 제작할 수 있는 것이 장점이다. 적층 가공 기술에 속하는 3D 프린터는 현재 직접적인 생산기술로 활용되기 보다는 완제품 이전의 시제품 제작 또는 금형 제작 등에 주로 사용되고 있으며,⁽¹⁾ 이는 사용 되는 재료가

† Corresponding Author, spark@cnu.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

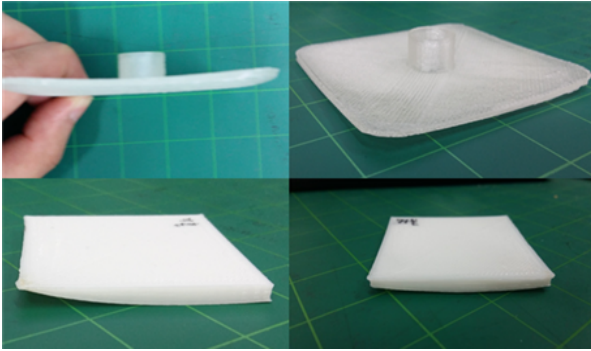


Fig. 1 Output of 3D printer using ABS materials

한정적이기 때문에 제작하는 출력물의 강도 및 정밀도가 제한적이기 때문이다. 이에 따른 3D 프린터에 대한 정밀도 향상에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 기존의 밀폐형 챔버(Heated Build Chamber:HBC) 구조의 3D 프린터에 대해서만 많은 연구가 이루어지고 있으며, 개방형 3D 프린터 정밀도 향상에 대한 연구는 부진한 실정이다. 본 논문에서는 구조가 간단하고, 가격이 저렴하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 FDM방식의 3D 프린터를 사용하였으며, 재료의 수축을 방지하기 위해 간단하면서 실속 있는 시스템을 개발하여 효율성을 높이고 누구나 쉽게 출력물의 완성도와 정밀도를 높일 수 있도록 하였다.

1.2 연구의 목적

보급형 FDM 3D 프린터의 경우 PLA와 ABS재질을 통상적으로 사용하며, ABS재질을 사용할 경우 Fig. 1과 같이 출력물의 휨이 발생하여 출력물 정밀도가 매우 낮다.⁽²⁾

현재 출력물 정밀도 향상을 위하여 출력 공간 하부에 히트베드(Heat Bad)를 설치하지만, 정밀한 출력물을 생성하기는 어렵다고 할 수 있다. 문제를 해결하기 위해 밀폐형 챔버가 장착된 프린터를 사용하지만 밀폐형 챔버가 장착된 프린터는 고가인 것이 단점이다. 또한 열 수축현상에 의해 고온으로 유지시켜야 하지만, 밀폐형의 경우 PCB, 스텝핑 모터(Stepping Motor), 타이밍 벨트(Timing Belt) 등에 영향을 줄 수 있기 때문에 고온으로 온도를 유지하기 힘들다. 따라서 개방형으로 출력 제품의 공간에만 높은 온도로 조절할 수 있는 외부 히팅 시스템을 생성하면 장비에 영향을 줄여줄 수 있으며, 출력 시 제품을 관찰하기 용이하여 오류를 줄일 수 있다.

1.3 연구의 내용

개방형 히팅 시스템을 제작하기 위하여 기존

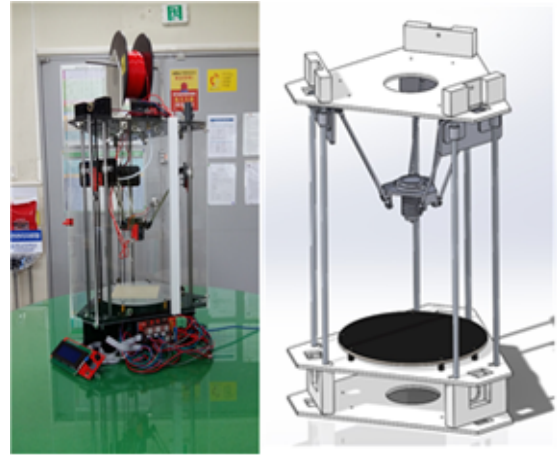


Fig. 2 3D printer and 3D CAD modeling

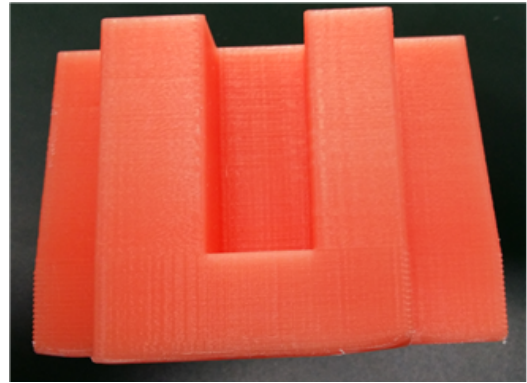


Fig. 3 Output of 3D printer using ABS materials

3D 프린터를 실측하여 CAD데이터를 생성하고, 해당 CAD데이터를 이용한 유한요소 해석을 통하여 휨의 원인을 연구하였다. 추가적인 열원을 배치해 휨을 줄여줄 수 있는 개방형 히팅 시스템을 구상하였으며, 실험을 통하여 확인하였다.

2. 유한요소 해석

2.1 시편 Modeling

출력물의 형상을 결정하기 위하여 다수의 출력물을 출력하여 관찰하였으며, 출력물의 휘어짐 현상은 모서리가 있는 부분부터 발생하며 일정한 높이가 되면 더 이상 휘지 않는 것을 Fig. 3과 같이 확인하였다. 출력물이 휘지 않는 높이를 찾기 위하여 고전 적층 이론(Classical Lamination Theory)을 이용하였다. 고전 적층이론의 출력물 곡률변형(δ) 공식은 다음과 같다.^(3,4)

$$\delta = \frac{1}{k} \left(1 - \cos \left(\frac{kl}{2} \right) \right)$$

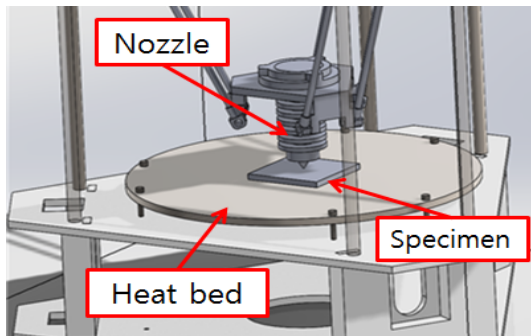


Fig. 4 Model of 3D printer mounted specimen for FEM

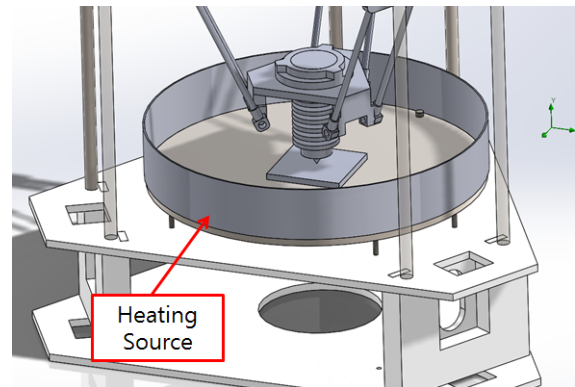


Fig. 6 Experiment equipment for FEM simulation

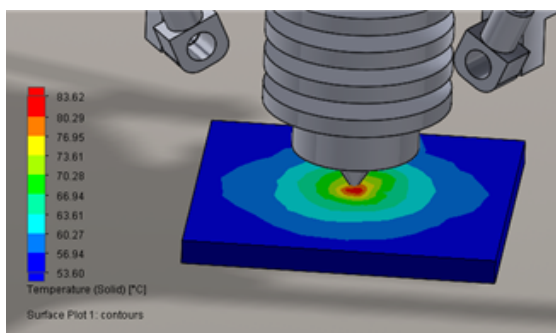


Fig. 5 FEM analysis of output

출력물 크기(L)는 50mm로 결정한 후 곡률변형 (δ)이 가장 크게 발생하는 적층 수를 Matlab R2010a를 이용하여 계산하였으며 5번째 레이어(k)에서 0.3147mm로 가장 높았으며 점차 안정화 하는 것을 확인하였다. 출력 실험 시 휘어짐 양을 측정하기 위하여 시편의 레이어 수는 20으로 결정하였으며, 한 개 레이어 높이 0.2mm로 총 4mm로 결정하였다. 따라서 시편은 50×50×4(mm) 직육면체로 결정하였다.

2.2 휘어짐 원인 분석

휘어짐 원인을 예측하기 위한 유한 요소 해석을 위한 최종 모델링은 Fig. 4와 같고, 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 해석 조건은 ABS재질로 출력 시와 동일하게 다음과 같이 정의하였다. 열원(Heat Sources)은 노즐부에서 250°C로, 히트베드에서 80°C로 발열 하고, 경계조건(Boundary Conditions)은 개방형에 맞게 압력개폐방식(Pressure Opening Type)은 정압(Static Pressure)으로 유체 및 열이 프린터의 내 외부로 자유롭게 오갈 수 있게 하였다. 출력물의 최고 온도는 83.62°C로 노즐과 맞닿는 부분에서 발생하였고, 최저 온도는 53.60°C로 출력물 외각에서 발생하였다. 또한 휨이 가장 많이 발생하는 각 모서리의 온도를 측정하였으며 최고 온

도는 56.11°C로 중간부분에서 나타났으며, 최저 온도는 53.27°C로 모서리 양 끝부분에서 나타났다.

출력 시 각 부분의 온도 분포가 균일 하지 못하여 수축 양이 동일하지 않게 되어 휨이 발생하는 것으로 분석하였다.

2.3 히팅 시스템 해석

유한 요소 해석에 의해 출력물의 온도 분포가 균일하지 않아 열 수축에 의해 휨이 발생하는 것으로 분석하였으며, 출력물의 모서리 양 끝 부분에서 온도가 가장 낮은 것을 확인하였다. 따라서 양 끝 부분의 온도를 상승시켜 온도 분포를 균일하게 해 주기 위하여 Fig. 6과 같이 히팅 베드 형상을 따라 Z방향으로 열원을 추가로 생성하였다.

해석은 SolidWorks2014의 Add-in인 FlowSimulation로 진행하였으며, 해석 조건은 이전 유한 요소 해석과 동일한 조건으로 Heat Sources는 노즐부에서 250°C로, 히팅 베드에서 80°C로 발열하고, Boundary Conditions은 개방형에 맞게 Pressure Opening Type의 Static Pressure로 유체 및 열이 프린터의 내 외부로 자유롭게 오갈 수 있게 하였으며 추가로 생성된 Heating Source부분에 히트베드 온도인 80°C부터 10°C씩 상승시켰으며 휨이 가장 많이 발생하는 모서리 부분의 온도 분포가 균일하게 되는 온도를 도출하였다.

추가 열원을 적용하였을 경우 상온일 경우보다 온도 분포가 좋아지긴 하였지만, 출력물의 중간점에서 높고 바깥쪽으로 갈수록 온도가 낮아지는 경향이 있는 것을 확인하였다. 이후 추가적으로 열을 높였을 경우 온도 분포가 좋아짐을 확인하였다. 기존 상온에서의 해석과 같이 휘어짐이 가장 많이 발생하는 모서리 부분의 온도 분포를 Fig. 7의 Distance라고 표기된 바와 같이 각 모서리 부분의 온도를 측정하였다.

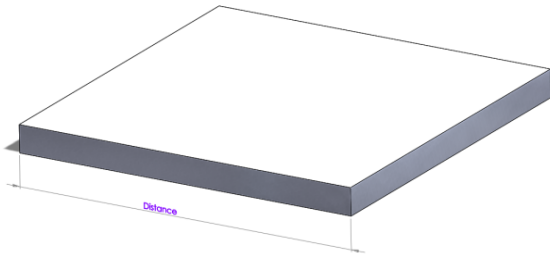


Fig. 7 Temperature measurement position of FEM

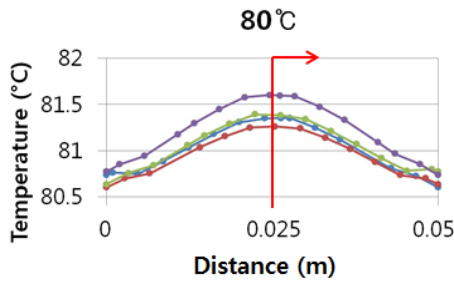


Fig. 8 Heat distribution of each edge in 80°C

Fig. 8은 추가된 Heating Source에 80°C를 적용하였을 때의 출력물 각 모서리의 온도를 측정된 그래프이다. 기존 해석시 보다 평균온도는 약 54.5°C에서 약 81°C로 26.5°C만큼 상승하였으며, 각 모서리의 온도차가 줄어든 것을 확인하였다. 또한 출력물의 중간과 모서리의 온도차이가 약 3°C 차이가 발생하였으나 열원을 추가함에 따라 약 1°C 정도의 차이로 줄어든 것을 확인하였다.

출력 시 온도의 분포가 균일하게 이루어져야 열 수축 양이 균일하게 이루어져 휨이 발생하지 않는다. 따라서 온도 분포 그래프의 기울기가 0에 가까울수록 출력물의 온도가 균일하다고 할 수 있다. 그래프는 대칭을 이루고 있으므로, 25mm부터 50mm까지의 데이터를 수치해석 기법인 최소 자승법(Least Square Method)을 이용하여 데이터의 최적 접합을 찾고 해당 기울기를 구하여 최적의 적용 온도를 찾아냈다.⁽⁵⁾

a_0 는 그래프의 절편을, a_1 은 그래프의 기울기를 나타내었고, 출력물 길이를 종속변수 y , 온도를 독립변수 x 로 나타내었다.

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \bar{x}$$

$$a_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

Fig. 9는 히팅 테이프의 온도를 80°C일 경우에

Table 1 Gradient of temperature distribution and difference between maximum and minimum values using heating system

Heating tape temperature (°C)	Gradients	Difference between maximum and minimum values (°C)
80	-33.693	0.8423
90	-25.4959	0.637397
100	-22.6857	0.567142
110	-19.8274	0.495685
120	-16.9705	0.424264
130	-13.9157	0.347893
140	-10.928	0.2732
150	-7.43683	0.185921
160	-2.39382	0.059846
170	-1.57822	0.039456
180	1.951833	0.048796
190	6.50234	0.153218
200	8.12871	0.212558
210	11.59019	0.289755

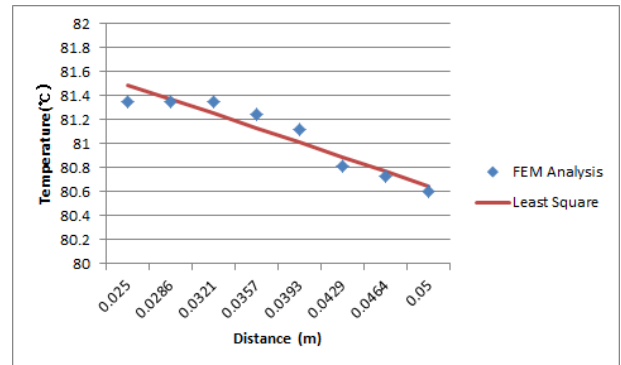


Fig. 9 Gradient of the temperature distribution by least square method in 80°C

온도분포 그래프의 기울기이며 -33.693로 매우 경사가 급해 온도 분포가 균일하지 않고 출력물 중간 부분이 열이 가장 높은 것을 알 수 있었다.

해석은 210°C까지 진행하였으며 170°C로 해석하였을 경우가 온도 분포가 가장 수평에 가까웠으며 온도를 더욱 상승하였을 경우에는 오히려 기울기가 더욱 급해지는 것을 Table 1과 같이 확인하였다.

열원의 적용 온도별 최소 자승법에 의한 기울기의 대소와 최고 온도와 최저 온도의 차이가 비례하는 것을 확인하였으며, 이에 따라 최소 자승법을 이용한 기울기가 0에 가까워질수록 온도 분포가 좋아지는 것을 알 수 있다. 열 해석을 통하여 출력물 휨의 원인으로 예상되는 온도 차이를 개방된 히팅 시스템을 통하여 완화할 수 있는 것을 확인하였다. 해석의 신빙성을 높이기 위하여 실험을

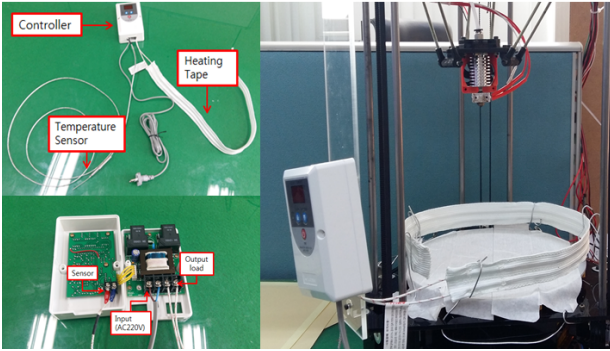


Fig. 10 Experiment equipment for heating system

진행하였다.

3. 히팅 시스템 실험

3.1 실험 방법

실험에 사용한 장비는 다음 Fig. 10과 같다. 장비의 구성은 온도를 조절할 수 있는 컨트롤러(Controller)와 온도를 측정할 수 있는 온도 센서(Temperature Sensor), 열을 방출하는 히팅 테이프(Heating Tape)로 이루어져 있다.

실험에 사용한 소프트웨어는 오픈소스인 Cura를 사용하였으며 출력물을 SolidWorks2014로 솔리드 3D CAD모델을 생성하였고 STL파일로 변환 하여 사용하였다. 출력물의 레이어 높이(mm)는 0.2, 셀 두께(mm) 1.5, 채우기 아래/위 두께(mm) 1.5, 채우기 밀도(%) 30, 프린트 속도(mm/s) 30, 프린팅 온도(°C) 250, 베드 온도(°C) 80, 필라멘트 지름(mm) 1.75 압출량(%) 70으로 설정하였으며, 서포터는 사용하지 않았다. 파일 전송 방법으로는 USB를 이용한 컴퓨터와의 연결 방법을 사용하였다. 실험은 상온에서부터 10°C씩 증가하여 온도분포 기울기가 0에 가장 근접했던 170°C까지 총 5회 반복 실험하였으며 관심 요인 외에 기타 원인들의 영향이 실험 결과에 미치지 않게 하기 위하여 실험 순서는 랜덤화(Randomization)하였다.

각 실험 측정된 결과의 평균값은 Table 2와 같다. 측정은 가장 휨이 발생하지 않는 출력물 정중앙의 크기와 휨이 가장 많이 발생한 모서리 부분을 측정하였으며 그 차를 휨의 값으로 정하였다. 또한 Z방향 설계 치수인 4mm와 출력물 정중앙의 차를 제작 오차로서 표기하였다.

상온에서 출력할 시 약 2mm 정도의 휘어짐이 발생하였으며 30°C까지는 휘어짐 완화가 눈에 띄게 좋아지지 않았다. 그러나 40°C부터는 상온 대비 약 36% 이상 완화 효과가 발생하였으며 온도

Table 2 Average measurement value of heating system experiments without air

Applied temperature (°C)	Middle measure (mm)	Minimum size (mm)	Warpage (mm)	Manufacturing errors (mm)
0	4.114	2.146	1.968	-0.114
30	4.078	2.224	1.854	-0.078
40	4.052	3.334	0.718	-0.052
50	4.082	3.516	0.566	-0.082
60	4.042	3.69	0.352	-0.042
70	4.028	3.768	0.26	-0.028
80	4.038	3.832	0.206	-0.038
90	4.004	3.794	0.21	-0.004
100	4.012	3.878	0.134	-0.012
110	4.008	3.874	0.134	-0.008
120	4	3.932	0.068	0
130	4.016	3.982	0.034	-0.016
140	4.013	3.987	0.026	-0.013
150	4.013	3.931	0.082	-0.013
160	4.013	3.971	0.042	-0.013
170	4.012	3.985	0.027	-0.012

를 높여 갈수록 설계 치수에 근접함을 알 수 있었다. 120°C로 적용하였을 경우 휘어짐이 0.1mm 이하인 0.068mm로 출력물이 정밀하게 출력되는 것을 확인하였으며, 이상으로 적용 후에는 휘어짐의 완화 폭이 줄어들었으며 휘어짐의 양이 0.1mm 이하로 완화하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 개방형 FDM방식 3D 프린터에서 출력할 시 휨이 많이 발생하는 ABS재질을 사용하여 출력 시의 휨의 완화를 위한 개방형 히팅 시스템에 대하여 연구하였다. FDM방식의 3D 프린터의 상용화를 위하여 기존의 고가인 밀폐형 히팅 시스템구조에서 간단한 개방형으로 또한 정밀도를 향상시키기 위하여 3차원 CAD 프로그램인 SolidWorks 2014로 보급형 FDM 3D 프린터를 도면화 하고, SolidWorks Add-in인 FlowSimulation을 사용하여 휨의 원인을 분석하였다. 또한 휨의 원인인 출력물 온도의 차이를 줄여주기 위하여 히팅 테이프를 이용한 히팅 시스템을 구상하고 유한요소 해석을 통하여 적용온도의 최적의 온도를 찾고, 실험을 통해 검증하였다. 120°C 이하에서는 노즐 및 3D 프린터의 핵심부품은 개방형과 노즐에 부착된 팬에 의해 큰 영향이 없으나, 120°C 이상으로 구동시 시스템에 영향을 미치는 것을 CFD 해석과 실험으로 검증하였다.

본 연구를 통하여 밀폐형이 아닌 개방형 히팅 시스템으로도 ABS재질의 힘이 완화하는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Bak, D., 2003, "Rapid Prototyping or Rapid Production? 3D Printing Processes Move Industry Towards the Latter," *Assembly Automation*, Vol. 23, No. 4, pp. 340~345.
- (2) Cha, H., 2014, "A Study on personal 3D Printer Safetyguide," Master Thesis, Graduate School Kumoh National Institute of Technology, Gumi.
- (3) Kim, G. D. and Lee, J. K., 2005, "Prediction of Curl Distortion using Classical Lamination Theory in Stereolithography," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 11, pp. 210~217.
- (4) Reddy, J.N., 1997, *Mechanics of Laminated Composite Plates*, CRC Press, pp. 135~141.
- (5) Steven C. C., 2008, "Applied Numerical Methods : with MATLAB for Engineers and Scientists," 2nd ed, McGraw-Hill Higher Education, Boston.

(1) Bak, D., 2003, "Rapid Prototyping or Rapid Production? 3D Printing Processes Move Industry