



## Temperature Analysis of Nozzle in a FDM Type 3D Printer Through Computer Simulation and Experiment

Jung Hyun Park, Min-Young Lyu<sup>†</sup>, Soon Yong Kwon\*, Hyung Jin Roh\*,  
Myung Sool Koo\*, and Sung Hwan Cho\*

*Product Design and Manufacturing Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Republic of Korea*

*\*Samyang Central R & D Center, 730 Daedeokdae-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea*

(Received December 6, 2016, Revised December 8, 2016, Accepted December 9, 2016)

**Abstract:** Additive manufacturing (AM), so called 3D Printing is a new manufacturing process and is getting attraction from many industries. There are several methods of 3D printing. Among them fused deposition modeling (FDM) type is most widely used by reason of cheap maintenance, easy operation and variety of polymeric materials. Articles manufactured by 3D printing have weak deposition strength compared with conventionally manufactured products. Deposition strength of FDM type 3D printed article is highly dependent of deposition temperature. Subsequently the nozzle temperature in the FDM type 3D printing is very important and it is controlled by heat source in the 3D printer. Nozzle is connected with heat block and barrel, and heat block contains heat source. Nozzle becomes hot through heat conduction from heat source. Nozzle temperature has been predicted for various thermal boundary conditions by computer simulation and compared with experimental measurement. Nozzle temperature highly depends upon thermal conductivities of heat block and nozzle. Simulation results are good agreement with experiment.

**Keywords:** 3D printing, fused deposition modeling, nozzle temperature, heat block, thermal conductivity

### Introduction

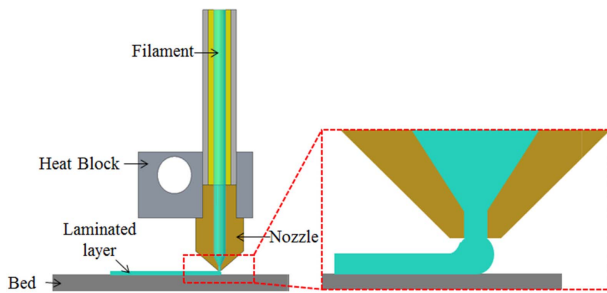
3D printing기술은 플라스틱 가공 기술들 중 한가지 방법으로 다품종 소량생산에 적합한 기술이며 현재 산업계에서 주목 받고 있는 기술이다.<sup>1,2</sup> 3D printing은 기존 플라스틱 성형 방법인 사출 또는 압출성형 등으로 가공하기 어려운 복잡한 형상의 제품을 금형 없이 단기간 내에 제작할 수 있어 매우 경제적이다. 이러한 3D printing의 적용 분야는 금형, 건축, 디자인, 우주항공, 그리고 의료분야까지 다양하다.<sup>3-7</sup> 3D printing 기술은 적층 기술에 따라 ASTM 규격에 의해 binder jetting, directed energy deposition, material extrusion, material jetting, powder bed fusion, sheet lamination, vat photopolymerization으로 나뉜다.<sup>8</sup> 이 가운데 material extrusion에 해당하는 fused deposition modeling (FDM)은 필라멘트 형태로 제공되는 열가소성 플라스틱을 nozzle부로 공급시키고 nozzle부의 heat block에 의해 용융된 재료를 한층 씩 적층하여 제품을 제작하는 방식이다. 용융된 재료가 nozzle을 통해 적층되는 모습을 Figure 1에 나타내었다. FDM type 3D printing은 제품 제작 비용이 비교적 저렴하며 장비 조작 방법이 간편하다.

또한 다양한 열가소성 플라스틱을 적용할 수 있어 3D printing 기술들 가운데 가장 많이 사용되고 있는 기술이다. FDM type 3D printing에 관한 연구들은 다양하게 진행되고 있으며 대표적으로 적층물의 기계적 강도에 관한 연구, 적층물의 휨 변형에 대한 연구 그리고 재료 압출 현상에 관한 연구 등이 있다.<sup>9-15</sup>

FDM type 3D printing으로 제작한 조형물의 강도는 일반적인 플라스틱 성형방법인 사출 성형으로 제작한 제품의 강도보다 현저히 떨어진다. 적층물의 강도는 적층하는 방향, 적층 속도, 적층 온도, chamber 온도, layer 두께 등에 영향을 받으며 이 가운데 적층 온도가 적층 강도에 가장 큰 영향을 미친다.<sup>13,15</sup> 따라서 FDM type 3D printing에서는 적층 온도의 조절이 조형물의 강도에 매우 중요한 역할을 한다. 또한 3D printer 시스템에 설정하는 온도는 heat block에 위치한 열선의 온도이며 실제로 필라멘트와 접촉하는 nozzle 내부의 온도는 시스템 설정 온도보다 낮을 것으로 예상된다. 그렇기 때문에 nozzle부의 온도분포에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 컴퓨터 해석을 통해 다양한 경계조건을 적용하여 FDM type 3D printer nozzle부의 온도 분포를 파악하였다. 그리고 컴퓨터 해석을 통해 분석한 nozzle 내부의 온도와 실험을 통해 측정된 nozzle 내부의 온도를 비교하여 nozzle

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr



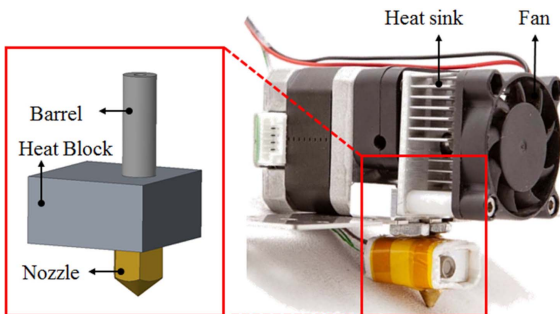
**Figure 1.** Extrusion of molten filament at the nozzle of FDM type 3D printing.

부 온도의 정확성을 확인하고자 하였다.

## Experimental

### 1. 연구 모델

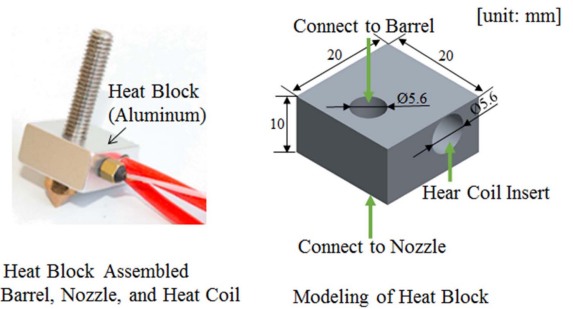
Figure 2는 FDM type 3D Printer에 사용되는 노즐 부의 구조이다. 노즐 부는 필라멘트 형태의 재료가 통과되는 barrel (Figure 3), 열선이 삽입되는 heat block (Figure 4) 그리고 heat block에서 가열된 필라멘트가 일정한 두께로 압출되는 nozzle (Figure 5)로 구성되어 있다. Figure 3~5에 barrel, heat block 그리고 nozzle의 형상과 치수를 각각 나타내었다.



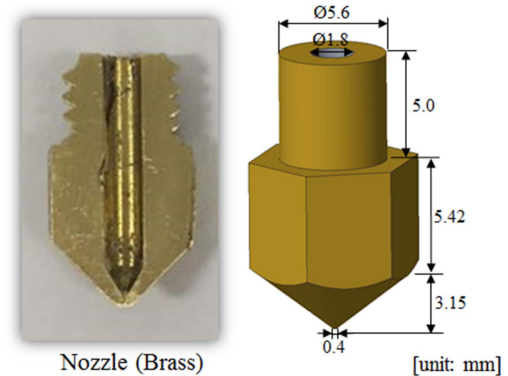
**Figure 2.** Photo of nozzle area in the FDM type 3D printing and 3D model.



**Figure 3.** Photo (left) and 3D model (right) of barrel.



**Figure 4.** Photo (left) and 3D model (right) of heat block.



**Figure 5.** Photo (left) and 3D model (right) of nozzle.

### 2. 재료

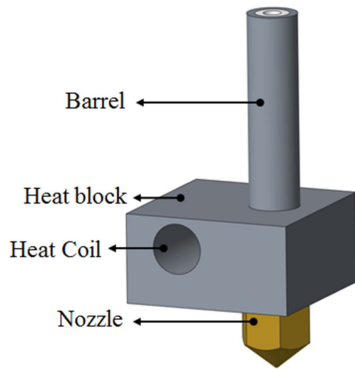
Barrel의 소재는 stainless이며 stainless barrel 내부에 PTFE (Polytetrafluoroethylene)소재의 튜브가 삽입되어있다. PTFE는 용융온도가 325°C~330°C로 내열성이 좋으며 열전도율이 낮아 barrel 내부의 filament에 대한 열 전달을 최소화 시킬 수 있다.<sup>16</sup> Barrel 내부의 filament가  $T_g$  이상의 온도로 가열되면 nozzle까지 재료가 제대로 공급되지 않는다. 따라서 barrel 안쪽 소재로 PTFE가 사용되고 있다. Heat block의 재료는 열전도도가 높은 aluminum이 사용되었고 nozzle 또한 열전도도가 높은 재료인 황동으로 제작되었다. 각 부품의 열적 물성을 Table 1에 나타내었다.

### 3. 해석을 위한 모델링

FDM type 3D printer의 온도 분포 해석에 사용한 모델은

**Table 1.** Thermal Property of Nozzle, Heat Block and Barrel

| Part          | Material  | Thermal conductivity (W/mm°C) |
|---------------|-----------|-------------------------------|
| Nozzle        | Brass     | 124                           |
| Heat block    | Aluminum  | 167                           |
| Barrel(Outer) | Stainless | 15.3                          |
| Barrel(Inner) | PTFE      | 0.261                         |



**Figure 6.** Assembled model of barrel, heat block, and nozzle for simulation.

barrel, heat block 그리고 nozzle을 assembly한 모델이며 Figure 6에 모델링 형상을 나타내었다.

#### 4. 해석 방법

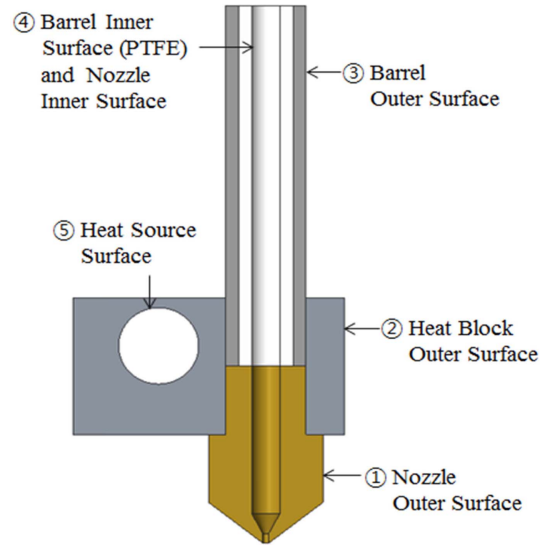
열전달은 단위시간당 온도 차이에 의한 열에너지의 이동으로 전도, 대류 그리고 복사 이렇게 3가지 방식으로 구분된다. FDM type 3D printer nozzle부의 열전달은 주로 부품간의 전도 그리고 대기와 nozzle간의 대류에 의해 이루어진다. 식 (1)과 (2)에 전도와 대류에 의한 열전달 방정식을 차례로 나타내었다.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

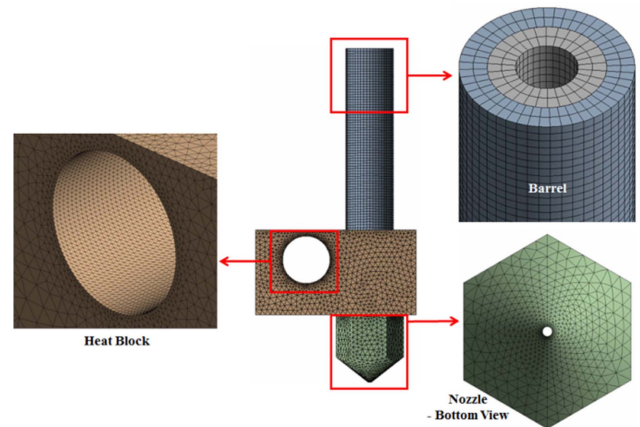
$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

$q$ 는 단위 시간당 열 유동량(heat flow),  $k$ 는 재료의 열전도도(thermal conductivity),  $T$ 는 온도,  $A$ 는 표면적,  $h$ 는 열전달 계수(heat transfer coefficient),  $T_s$ 는 재료의 표면온도 그리고  $T_\infty$ 는 주변 온도를 나타낸다. 본 연구에서는 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS WORKBENCH를 이용하여 정상상태에서 해석 조건에 따른 FDM type 3D printer nozzle부의 열전달 해석을 진행하였다.

해석에서 기본 경계조건을 부여하는 위치를 Figure 7에 나타내었다. Nozzle, heat block 그리고 barrel은 모두 완전히 붙어있다고 가정하여 bonded 조건을 적용하였다. 대기(상온 25°C) 중에 있는 nozzle의 외부 표면과 내부 표면, heat block의 외부 표면 그리고 barrel의 외부표면과 내부 표면에 대류조건을 적용하였고 열전달 계수( $h$ )는 20W/m<sup>2</sup>°C이다. 그리고 heat block에 위치한 열선 삽입부에 온도를 설정하였다. 해석은 위에 언급한 경계조건을 기본조건으로 하여 해석하였다. 그리고 재료의 thermal conductivity를 기본조건인 1/2배 그리고 1/3배로 설정하여 온도분포를 비교분석 하였다. 또한 heat block 외부 표면에 단열조건을 주었을 때의 온도 분포



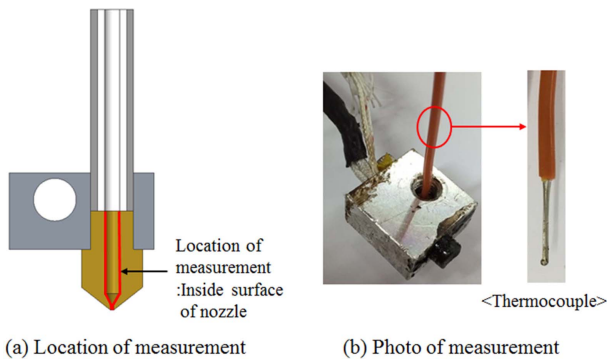
**Figure 7.** Surfaces to assign boundary conditions for simulation.



**Figure 8.** Mesh generation for simulation.

를 비교하였다. 그리고 barrel 부에 강제 대류 조건을 적용하였을 때 온도분포 결과 값과 기본조건인 결과 값을 비교하였다. FDM type 3D printer nozzle 부의 barrel이 높은 온도로 가열되는 것을 방지시키기 위해 barrel 부분에 fan이 설치되어 있다. 따라서 barrel 외부표면에 강제대류조건을 적용하여 자연대류조건을 적용하였을 때와 비교해 보았다. 강제 대류 계수는 자연 대류 계수의 10배인 200 W/m<sup>2</sup>°C로 적용하였다. 부품 간의 접촉 조건에 따른 온도분포를 파악하기 위해 각 부품 간의 contact 조건을 no separation 조건을 적용하여 기본조건인 bonded조건을 적용하여 해석한 결과 값과 비교하였다. Bonded 조건은 부품간 접촉면이 떨어지지 않고 미끄러짐도 불가능하게 하는 조건이고 no separation 조건은 부품간 접촉면이 떨어지지 않고 미끄러짐만 가능하게 하는 조건이다.

해석을 위한 3차원 메시는 사면체 요소와 육면체 요소의 조합으로 총 219,725개의 요소로 Figure 8과 같이 형성하였다.



**Figure 9.** Location of temperature measurement and photo of measurement.

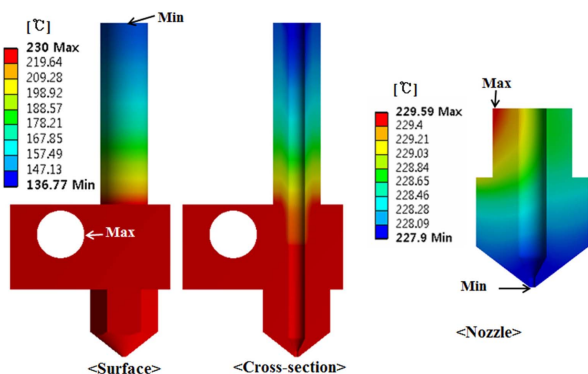
## 5. 온도 측정

유한요소해석을 통해 구해진 nozzle부의 온도분포 결과 값과 실제 nozzle부의 온도를 비교하기 위해 접촉식 온도 미터를 이용하여 nozzle 내부의 온도를 측정하였다. 측정 장비는 FLUKE 사(미국)의 FLUKE-53-2B 온도 미터를 사용하였다. 측정 정확도는  $0.05\%+0.3^{\circ}\text{C}$ 이며 측정가능 온도 범위는  $-250^{\circ}\text{C}\sim 1767^{\circ}\text{C}$ 이다. 본 연구에서는 3D printer 온도 설정을  $210^{\circ}\text{C}$ ,  $230^{\circ}\text{C}$  그리고  $250^{\circ}\text{C}$ 로 하여 nozzle 내부의 온도를 측정하고 해석 값과 비교하였다. Figure 9에 온도 측정 위치와 측정 모습을 나타내었다.

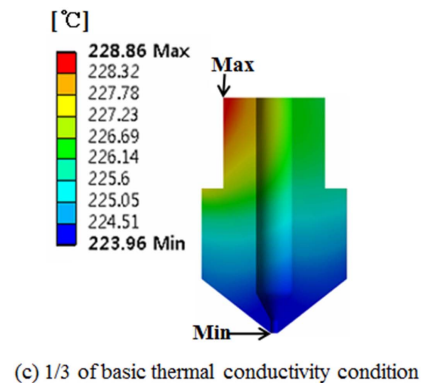
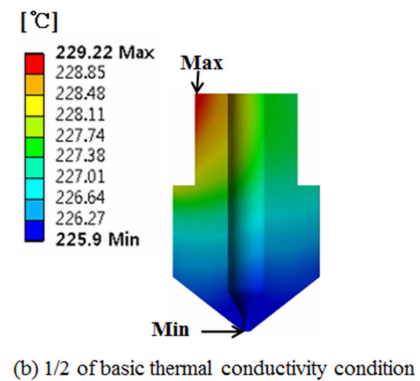
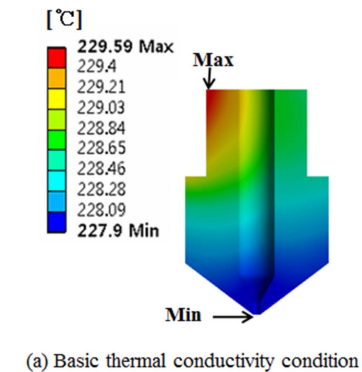
## Results and Discussion

### 1. 재료의 열전도도에 따른 온도 분포

Figure 10은 기본조건을 적용하여 해석한 온도분포 결과 값이며 Figure 11은 재료의 열전도도를 기본조건에서 1/2배 그리고 1/3배로 설정하여 해석하였을 때 노즐의 온도 분포이다. Heat block 열선 삽입부의 온도를  $230^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였을 때



**Figure 10.** Temperature distribution in barrel, heat block, and nozzle for basic condition.

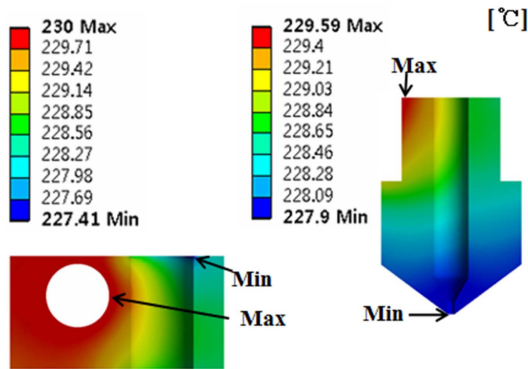


**Figure 11.** Temperature distribution in the nozzle for various thermal conductivities.

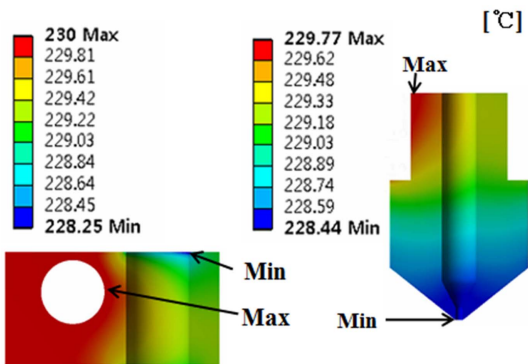
기본조건에서 nozzle의 최대 온도는  $229.59^{\circ}\text{C}$ 이며 최저온도는 nozzle 출구 부분에서  $227.9^{\circ}\text{C}$ 로 나타난다. 재료의 열전도도를 기본조건에서 1/2배 그리고 1/3배로 적용하였을 때 노즐에서의 최대 온도는 각각  $229.22^{\circ}\text{C}$ ,  $228.86^{\circ}\text{C}$ 이며 최저 온도는 노즐 출구에서 각각  $225.9^{\circ}\text{C}$ ,  $223.96^{\circ}\text{C}$ 이다. 재료의 열전도도가 낮아 질수록 열전도율이 떨어져 노즐의 온도가 다소 낮아지는 것을 알 수 있다.

### 2. 단열조건에 따른 온도 분포

Heat block 외부 표면에 대류조건(basic condition)을 적용하였을 때의 온도해석 결과 값(Figure 12(a))과 단열조건을 적용



(a) Convection condition (basic condition)



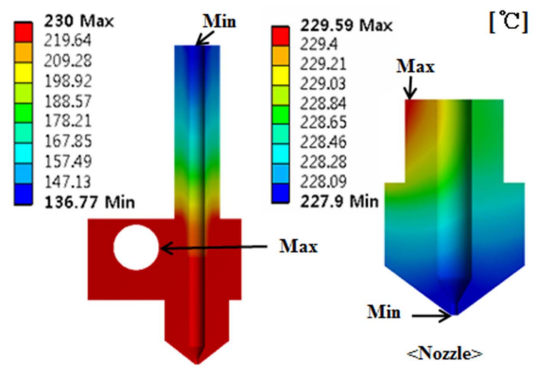
(b) Insulation condition

**Figure 12.** Comparison of temperature distribution in the heat block and nozzle for convection and insulation condition.

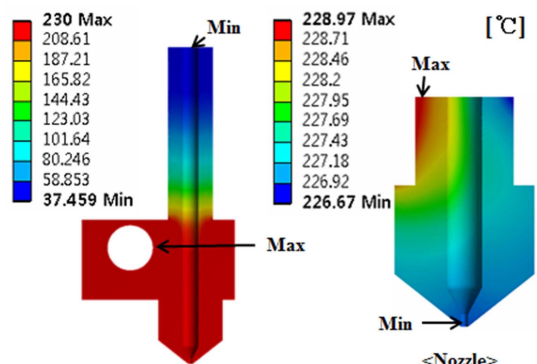
하였을 때의 온도 해석 결과 값(Figure 12(b))을 비교하였다. 대류조건을 적용하였을 때 heat block과 nozzle의 최대온도는 각각 230°C, 229.59°C이며 최저온도는 227.41°C 그리고 227.9°C이다. Heat block 외부 표면에 단열조건을 적용하였을 때 heat block과 nozzle의 최대온도는 각각 230°C, 229.77°C이며 최저온도는 각각 228.25°C, 228.44°C이다. 대류조건을 적용한 경우 대기와 heat block사이의 대류에 의해 heat block의 열이 대기 중으로 전달되어 단열조건을 적용하였을 때 보다 heat block과 nozzle의 온도가 약간 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

### 3. 강제 대류조건에 따른 온도분포

Barrel부에 자연대류조건(basic condition)을 적용하였을 때와 강제대류조건을 적용하였을 때의 nozzle부의 온도분포를 Figure 13에 나타내었다. Barrel 외부 표면에 강제대류를 적용하였을 때 자연대류조건을 적용하였을 때 보다 barrel의 온도가 37.46°C로 낮아졌으며 nozzle의 온도 또한 다소 낮게 분포하는 것을 알 수 있다. Barrel 부의 강제대류는 nozzle의 온도에 크게 영향을 주지 않았다고 판단된다.



(a) Convection condition (basic condition)



(b) Forced convection condition

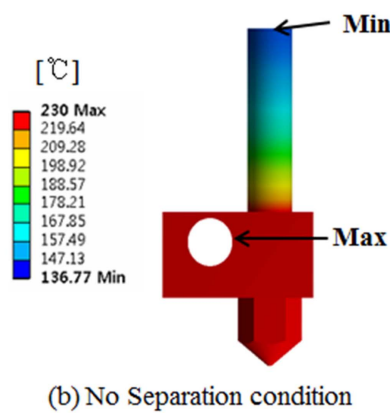
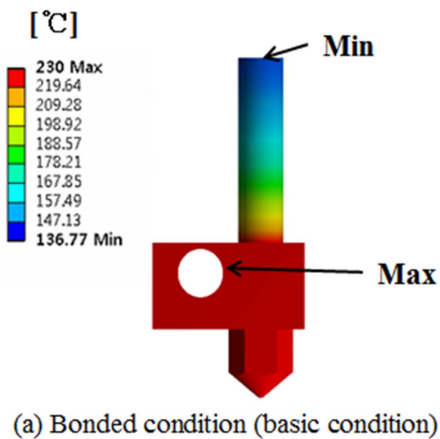
**Figure 13.** Comparison of temperature distribution for convection and forced convection condition.

### 4. 부품 간 접촉 조건에 따른 온도분포

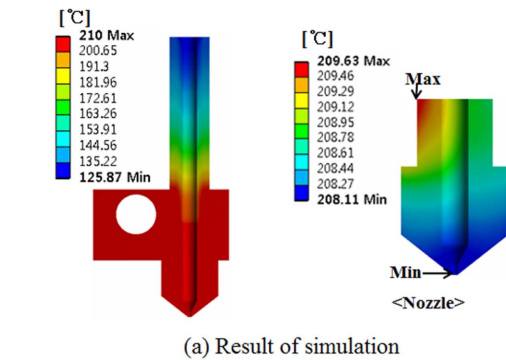
각 부품간의 contact조건을 bonded 조건(basic condition)으로 적용하였을 때와 no separation 조건을 적용하였을 때의 온도분포 해석 결과 비교 그림을 Figure 14에 나타내었다. 두 해석결과 값에 차이가 없는 것으로 보아 contact 조건에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

### 5. 컴퓨터 해석 결과 값과 실험 값 비교

유한요소 해석을 통해 구한 노즐 부의 온도분포 결과 값과 실제 노즐 부의 온도를 비교하기 위해 접촉식 온도 미터를 사용하여 노즐 내부의 온도를 측정하였다. Figure 15(a)는 heat block 열선 삽입부의 온도를 210°C로 설정하였을 때의 해석 결과이며 Figure 15(b)는 실제 노즐 내부의 온도 측정값이다. 해석 결과 노즐 내부의 온도는 약 209°C~208°C이며 측정값은 약 208.2°C로 해석 결과와 유사하였다. Figure 16는 온도 설정을 230°C로 하였을 때의 해석 결과 값(Figure 16(a))과 실험을 통한 측정값(Figure 16(b))이다. 해석결과 노즐내부의 온도는 약 229.5°C~227.9°C로 나타났으며 측정값은 약 227.5°C

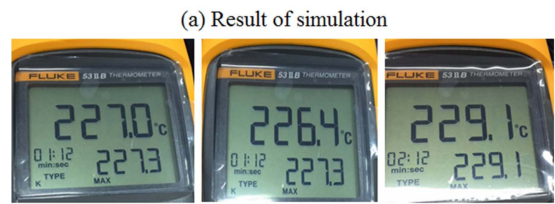
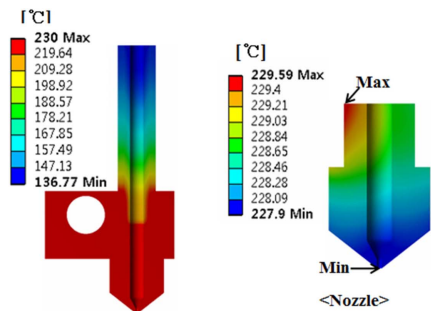


**Figure 14.** Comparison of temperature distribution for contact condition.

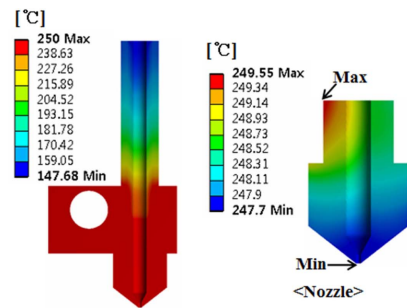


**Figure 15.** Comparison of computational result and measurement for 210°C of heat source.

로 비슷한 결과를 보였다. Figure 17에 온도설정을 250°C로 하였을 때의 해석 결과 값(Figure 17(a))과 측정값(Figure 17(b))을 나타내었다. 해석결과 노즐 내부의 온도는 약 249.5°C~



**Figure 16.** Comparison of computational result and measurement for 230°C of heat source.



**Figure 17.** Comparison of computational result and measurement for 250°C of heat source.

247.7°C로 나타났으며 측정값은 약 248°C로 나타났다. 이 또한 해석 결과 값과 측정값이 매우 유사하였다.

## Conclusion

본 연구에서는 FDM type 3D printer의 nozzle부에서 재료의 열전도도에 따른 온도 분포, 단열조건에 따른 온도 분포, 대류조건에 따른 온도 분포 그리고 부품간 contact 조건에 따른 온도 분포를 컴퓨터 해석을 통해 관찰하였다. 그리고 컴퓨터 해석을 통해 구해진 온도분포 결과 값과 실제 실험을 통해 측정된 노즐 내부의 온도분포 결과 값을 비교하였다.

Nozzle부 재료의 열전도도가 낮을 수록 nozzle부의 온도가 다소 낮게 분포하였다. Heat block에 단열 조건을 적용한 경우와 대류조건을 적용한 경우를 비교해보면 단열조건을 적용하였을 때 대기로 열이 빠져나가지 못하여 대류조건을 적용하였을 때 보다 nozzle부의 온도가 다소 높게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. Barrel 부에 강제대류조건을 적용하였을 때 자연대류조건을 적용하였을 때 보다 barrel의 온도는 크게 낮아졌으나 nozzle의 온도는 크게 변하지 않았다. 그리고 부품간의 contact 조건을 bonded 조건을 적용한 경우와 no seperation 조건을 적용한 경우의 해석 결과 값의 차이는 없었으며 이를 통해 contact조건은 온도분포 해석에 영향이 없음을 확인할 수 있었다. 또한 컴퓨터 해석을 통해 구해진 온도 값과 실험을 통해 노즐 내부의 온도를 측정한 결과 값이 매우 유사한 결과를 보였다. 이상의 결과로 heat block의 heat source 온도는 nozzle의 온도를 잘 제어하고 있음을 확인할 수 있었다.

## Acknowledgments

본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재개발).

## References

1. B. C. Gross, J. L. Erkal, S. Y. Lockwood, C. Chen, and D. M. Spence, "Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences", *Analytical Chemistry*, **86**, 3240 (2014).
2. D. Dutta, F. B. Prinz, D. Rosen, and L. Weiss, "Layered manufacturing: current status and future trends", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, **1**, 60 (2001).
3. S. J. Jung and T. H. Lee, "Study of Trends in The Architecture and The Economic Efficiency of 3D Printing Technology", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, **15**, 6336 (2014).
4. E. Bassoli, A. Gatto, L. Iuliano, and M. Grazia Violante, "3D printing technique applied to rapid casting" *Rapid Prototyping Journal*, **13**, 148 (2007).
5. S. Bose, S. Vahabzadeh, and A. Bandyopadhyay, "Bone tissue engineering using 3D printing", *Materials Today*, **16**, 496 (2013).
6. K. T. Han, "Research on Die Machining using 3D Printing and CAM System", *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, **18**, 91 (2014).
7. S. C. Joshi and A. A. Sheikh, "3D printing in aerospace and its long-term sustainability", *Virtual and Physical Prototyping*, **10**, 175 (2015).
8. ASTM F2792-12a, "Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies", ASTM International (2012).
9. T. M. Wang, J. T. Xi, and Y. Jin, "A model research for prototype warp deformation in the FDM process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **33**, 1087 (2007).
10. L. Xinhua, L. Shengpeng, L. Zhou, Z. Xianhua, C. Xiaohu, and W. Zhongbin, "An investigation on distortion of PLA thin-plate part in the FDM process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **79**, 1117 (2015).
11. S. H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", *Rapid Prototyping Journal*, **8**, 248 (2002).
12. S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M.-Y. Lyu, "Deposition Strength of Specimen Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer", *Polymer (Korea)*, **40**, 846 (2016).
13. M. Roxas, "Fluid dynamics analysis of desktop-based fused deposition modeling rapid prototyping", *Doctoral dissertation, University of Toronto*, (2008).
14. B. N. Turner, S. Robert, and A. G. Scott, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling", *Rapid Prototyping Journal*, **20**, 192 (2014).
15. Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments", *Rapid Prototyping Journal*, **14**, 72 (2008).
16. D. M. Price and M. Jarratt, "Thermal conductivity of PTFE and PTFE composites", *Thermochimica Acta*, **392**, 231 (2002).