



Cooling and Deformation Analysis of a Layered Road in a FDM Type 3D Printing Through Thermal-structural Coupled Simulation

S. L. Kim and M.-Y. Lyu[†]

*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*

(Received September 16, 2017, Revised September 21, 2017, Accepted September 27, 2017)

Abstract: The additive manufacturing technology, also called 3D printing, is growing fast. There are several methods for 3D printing. Fused deposition modeling (FDM) type 3D printing is the most popular method because it is simple and inexpensive. Moreover, it can be used for printing various thermoplastic materials. However, it contains the cooling of layered road and causes thermal shrinkage. Thermal shrinkage should be controlled to obtain high-quality products. In this study, temperature distribution and cooling behavior of a layered road with cooling are studied through computer simulation. The thermal shrinkage of the layered road was simulated using the calculated temperature distribution with time. Shape variation of the layered road was predicted as cooling proceeded. Stress between the bed and the layered road was also predicted. This stress was considered as the detaching stress of the layered road from the bed. The simulations were performed for various thermal conductivities and temperatures of the layered road, bed temperature, and chamber temperature of a 3D printer. The simulation results provide detailed information about the layered road for FDM type 3D printing under operational conditions.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, fused deposition modeling, layered road, thermal-structural simulation

Introduction

적층성형(Additive Manufacturing, AM)은 전통적인 절삭가공이나 금형을 이용한 성형에 비해 복잡한 형상의 제품을 단기간에 제작할 수 있는 장점을 갖고 있다. 적층성형을 3D프린팅이라고 부르는데 이의 장점으로 제조산업에 큰 혁신을 불러 일으키고 있다.^{1,2} 3D 프린팅은 시제품 제작은 물론 의료 분야를 비롯하여, 항공, 의류, 건축, 자동차 산업 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있다. 3D 프린팅은 제조 방식에 따라 크게 FDM (Fused Deposition Modeling), SLS (Selective Laser Sintering), SLA (Stereolithography Apparatus), Material Jetting 등으로 분류되고 있다.³⁻⁵ 이 중 FDM 방식은 열가소성 수지를 필라멘트 형태로 제작한 후 이를 용융시키면서 노즐을 통해 압출하여 한층 씩 적층하는 방식이다. FDM방식은 조작이 간편하고 다양한 재료와 색상의 적용이 가능하여 가장 대중적으로 활용되고 있다.⁵

3D프린팅을 이용한 제작방법은 기존의 절삭이나 성형방법에 비해 생산성이 낮고 제품의 정밀도 역시 매우 낮다. 또한 제품의 크기에도 큰 한계를 가지고 있다. 이를 극복하고자 하는 연구는 계속 진행되고 있으며 앞으로도 꾸준히 필요하다.

FDM 타입 3D 프린팅의 연구 분야는 적층물의 기계적 물성, 변형, 휨, 표면조도, 그리고 노즐에서 용융체의 연구 등 다양하다.⁶⁻¹⁴ 또한 대형화되거나 색상 믹싱이 가능한 FDM 타입 3D 프린팅 연구에도 크게 관심을 갖고 있다.^{15,16} 3D프린팅 적층물이 제품으로서의 역할을 위해서는 먼저 치수의 정밀도가 중요하다. 그러나 FDM타입 3D프린팅 적층물은 다른 적층방법에 비해 치수정밀도가 가장 취약하다. FDM 타입 3D 프린팅은 원형의 필라멘트가 프린터의 배럴을 통해 공급되고 필라멘트가 배럴 끝에 있는 노즐을 지나면서 녹아 압출된다. 노즐은 열 블록(heat block)에 의해 열을 공급받아 필라멘트를 녹게 한다.¹⁷ 이렇게 녹은 필라멘트가 원형 스트랜드로 압출되면서 적층되어 제품을 제작한다. 높은 온도로 압출된 스트랜드는 프린터의 챔버 내에서 적층되면서 냉각하게 된다. 이러한 적층과 냉각과정을 거치면서 적층물이 완성되는데 냉각에 의한 수축은 불가피하다. 이에 따라 적층물은 변형을 하게 되어 적층물의 치수품질이 저하된다. 열과 이에 따른 변형의 연계해석은 사출기 배럴의 열과 압력에 의한 변형해석에서 찾을 수 있으며,¹⁸ FDM 타입3D프린팅 적층물의 열변형 해석에 대한 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 FDM 타입 3D프린팅 적층물의 변형 제어를 위한 연구가 필요하고, 이를 통해 공정 조건 설정 등의 가이드라인이 필요하다.

본 연구에서는 FDM 타입 프린팅으로 제작된 적층물의 열

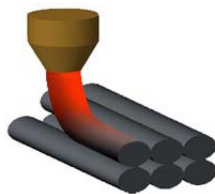
[†]Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

변형을 해석하기 위한 가장 기초적인 단계로 한 개의 적층로드(layered road)에 대한 열해석과 변형해석을 수행하였다. 한 개의 적층로드가 챔버내 베드에서 냉각되는 과정을 비정상해석(transient simulation)을 통해 시간에 따른 온도분포를 계산하였다. 계산된 시간에 따른 온도분포를 이용하여 시간이 지나면서 적층로드가 식어가면서 일어나는 변형을 해석하였다. 이러한 해석을 통해 베드와 적층물 사이의 응력을 산출할 수 있고 이는 적층물이 베드에서 이탈되지 않도록 구속하기 위한 응력이다. 그리고 원형 로드와 적층물이 식은 후의 형상을 예측하였다. 적층물의 냉각에 영향을 주는 베드온도, 챔버온도, 적층온도, 그리고 소재의 열전도도의 변화에 따라 해석하고 분석하였다.

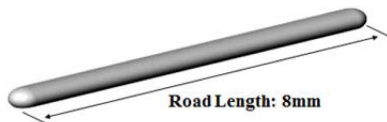
Simulation Model

1. 해석모델

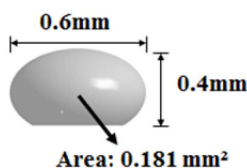
Figure 1에 본 연구에서 사용한 해석모델의 형상과 치수를 나타내었다. FDM 타입 3D 프린터의 노즐에서 용융된 필라멘트가 분출되어 베드 위에 적층된다. 해석에 사용된 적층된 로드(road)의 전체 길이는 8 mm이며 노즐이 80 mm/s의 속도로 이동하며 0.1s 동안 하나의 로드를 적층했다고 가정했다. 적층된 단면은 가로 0.6 mm, 세로 0.4mm의 타원 형태라고 가정한다. 필라멘트는 특정온도의 베드와 접촉하며 적층되고, 이 때 챔버 온도도 특정 온도로 조절된다. 챔버온도, 베드온



(a) Schematic Drawing of FDM Type 3D Printing



(b) One Road Model for Simulation



(c) Cross-section of Road

Figure 1. Study Model for Thermal-Structural Coupled Simulation of Layered Road in FDM Type 3D Printing.

Table 1. Various Printing Conditions for Simulation

Chamber Temp [°C]	Bed Temp. [°C]	Nozzle Temp. [°C]	Thermal Conductivity of Material [W/m·°C]
25	25	250	0.1
100	120	275	0.2
		300	0.4

Table 2. Material Property used in This Study

Property	Unit	Value
Density	kg/m ³	1310.6
Specific heat	J/kg·°C	1100
Coefficient of thermal expansion	10 ⁻⁶ /°C	60
Isotropic thermal conductivity	W/m·°C	0.1
Young's modulus	GPa	2.296
Poisson's ratio		0.36

도, 노즐온도, 그리고 재료의 열전도도를 변수로 하여 해석을 진행하였다. 각 변수에 대한 값은 Table 1에 나타내었다. 챔버온도 25°C, 베드온도 120°C, 노즐온도 275°C, 열전도도 0.2 W/m°C를 기준(basis)으로 하나의 변수씩 변화시킬 때, 각 변수가 적층물 변형에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료

본 해석에 사용한 재료는 Polycarbonate (PC)를 기준으로 하였다. 이에 대한 물성은 Table 2와 같다.

Simulation Method

1. 해석 개요

Figure 2는 본 연구에서 진행된 해석의 전체적인 흐름을 나타낸 것이다. 먼저 본 해석, 즉 로드와 냉각해석에 적용될 합리적인 초기 온도를 결정하고, 그 온도를 로드와 세팅하기 위해 선행해석을 실시하였다. 1차 선행해석 결과를 바탕으로 8 mm의 로드와 적층된 0.1초 이후의 합리적인 온도를 결정하였다. 그리고 이 온도를 2차 선행해석인 정상(steady)열해석을 통해 로드 체적에 세팅하였다. 이는 로드와 베드에 적층된 직후, 즉 노즐팁이 로드에서 떨어진 직후의 로드 내부의 온도분포이다. 이는 1차 본 해석인 비정상열해석의 초기조건이 된다. 이러한 초기조건을 가지고 1차 본 해석에서는 비정상열해석으로 로드와 대기와의 대류작용에 의해 식어가는 현상을 관찰하였다. 이후 이 결과를 2차 본 해석인 비정상 구조해석과 연계하여 열하중에 의한 로드와 변형을 계산하였다.

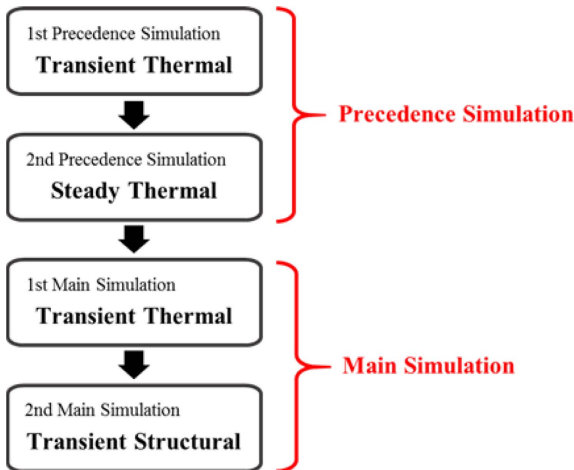


Figure 2. Procedure for Thermal-Structural Coupled Simulation.

2. 열해석

열전달은 단위시간당 온도 차이에 의한 열에너지의 이동으로 전도, 대류, 그리고 복사 3가지 방식으로 구분된다. 베드에 적층된 로드에서는 로드 내부의 열전도와 로드 표면과 대기와의 열대류라는 크게 2가지의 열전달이 이루어진다. 식 (1)과 식 (2)에 전도와 대류에 대한 열전달 방정식을 나타내었다.¹⁹ 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_∞ 는 주변 온도를 나타낸다.

$$k \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + k \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + k \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

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

위의 두 식을 이용하면 적층로드의 시간에 따른 온도를 구할 수 있다. 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH를 사용하여 해석을 진행하였다. Figure 3은 로드 유한요소모델을 보여준다. 메시형상은 3차원 육면체 메시(hexahedral mesh)를 사용하였다.

Figure 4는 Figure 2에 설명한 1st Precedence Simulation에 해당되는 비정상열해석에 쓰이는 경계조건 및 초기조건이다. 로드 바닥면은 베드와 맞닿고 있어 베드온도를 경계조건으로

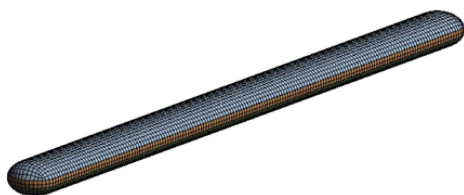


Figure 3. Mesh for Simulation.

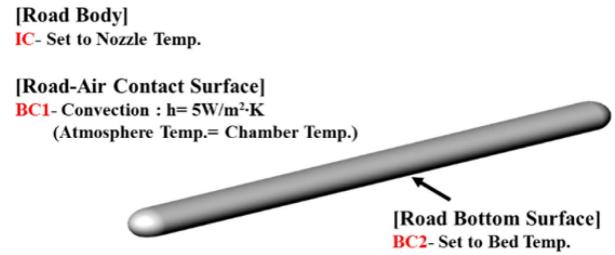


Figure 4. Boundary Conditions and Initial Condition for Transient Thermal Analysis.

로 적용하였다. 로드의 나머지 표면은 대기와 맞닿고 있어 챔버온도와 자연대류($h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$)상태를 경계조건으로 적용하였다. 2nd Precedence Simulation에 해당되는 정상 열해석은 1st Precedence Simulation에서 구한 온도를 로드체적에 적용하는 하는 것이다. 이 해석에서는 맨 먼저 노즐을 통해 압출되어 적층된 로드의 초기 단면을 베드의 높이 방향으로 4개의 영역으로 나누어서 여기에 1st Precedence Simulation에서 구한 온도를 적용한다. 그리고 노즐쪽의 로드 단면 즉, 가장 늦게 압출된 로드의 전체 단면은 노즐의 온도로 적용한다. 그 다음에 Figure 4의 경계조건으로 정상해석을 수행한다. 이 해석으로 적층된 로드 온도가 셋팅되는데 이 온도가 로드 가식어가는 해석, 즉 본 해석(Figure 2의 Main Simulation)의 초기조건이 된다. 본 해석에서 비정상 열해석의 경계조건은 Figure 4에 나타낸 경계조건과 같고, 해석의 초기조건은 선행 해석결과를 이용해 로드 체적에 셋팅된 온도, 즉 2nd Precedence Simulation의 결과이다.

3. 변형해석

Figure 5는 Figure 2의 2nd Main Simulation (Transient Structural)에 해당되는 비정상 구조해석에 적용되는 경계조건 및 초기조건이다. 로드바닥면은 베드와 분리되지 않는다고 가정하여 Fixed Support 경계조건을 적용하였다. 이외 나머지 로드 표면은 Free surface로 열하중에 따른 변형이 자유롭게 발생하도록 하였다. 초기조건은 노즐의 온도가 적용되고 그 다음의 시간에 따른 온도는 1st Main Simulation에서 구한 온도를 적용하였다.

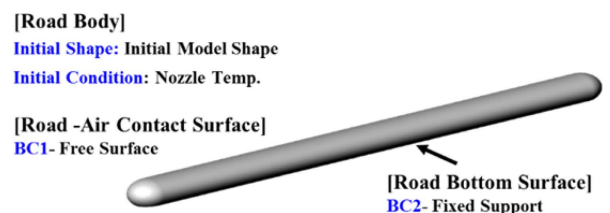


Figure 5. Boundary Conditions and Initial Condition for Transient Structural Analysis.

Simulation Results and Discussion

1. 적층로드의 냉각

Figure 6은 노즐의 온도 250°C, 275°C(기준조건), 그리고 300°C의 초기온도조건에서 1st Main Simulation (Thermal Transient)을 실시한 후 이들의 시간에 따른 온도분포를 보여주고 있다. Figure 7은 로드에서 시간에 따른 최대온도를 그래프로 나타낸 것이다. 모든 노즐온도에서 약 1.5초부터는 로드 전체적으로 균일한 온도분포를 가지는 것을 알 수 있다. 초기 온도에 상관없이 각 로드 온도 베드온도인 120°C로 정상상태에 도달하기까지는 걸린 시간은 약 2.5초로 동일했다. 로드 내부에서 충분히 열전도가 일어난 것으로 보여진다.

Figure 8은 챔버온도와 베드온도를 변화시켰을 때 각 조건 별 시간에 따른 로드 온도분포를 보여주고 있다. Figure 9는 기준조건, 기준조건에서 챔버온도만 100°C로 높인 경우, 그리고 기준조건에서 베드온도만 25°C로 낮춘 경우에서의 비정상열해석을 실시하고 시간에 따른 최대 온도변화를 비교한 그래프이다. 챔버온도만 높인 경우에는 기준 조건에서 경우와 마찬가지로 약 2.5초 후에 정상상태에 도달하였다. 그러나 베드온도를 25°C로 낮춘 경우, 정상상태로 도달하기 까지 걸린 시간은 약 3.5초로, 기존 조건 대비 증가하였다. 챔버온도를

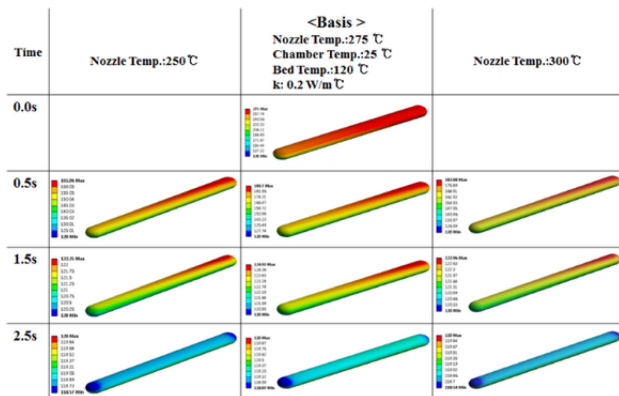


Figure 6. Temperature Distribution for Time according to Nozzle Temperature.

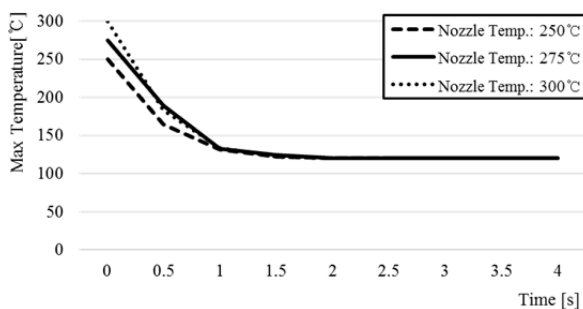


Figure 7. Maximum Temperature in the Road for Time according to Nozzle Temperature.

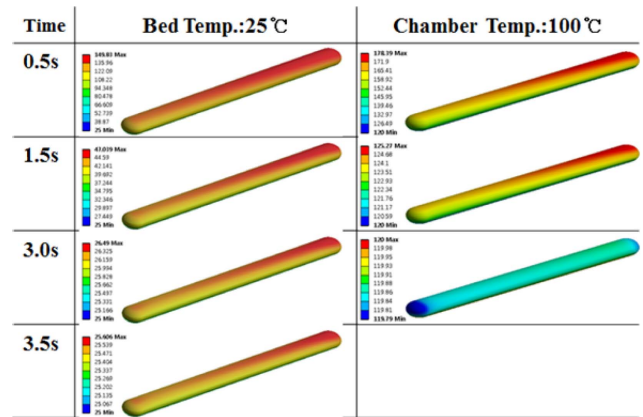


Figure 8. Temperature Distribution for the Change of Bed Temperature and Chamber Temperature.

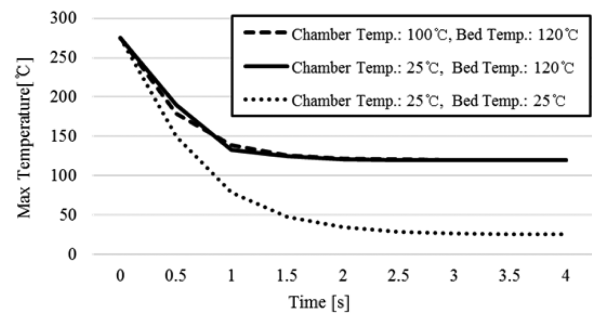


Figure 9. Maximum Temperature in the Road for Chamber Temperature and Bed Temperature.

100°C 높은 경우에는 시간에 따른 최대온도 변화가 기준조건과 유사하다. 챔버온도는 로드 냉각과정에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

Figure 10은 각 로드 온도 분포를 변화시켰을 때 시간에 따른 로드 온도 분포가 나타나 있다. Figure 11은 기준조건과, 기준조건에서 열전도도를 1/2배, 그리고 2배로 설정한 경우에서 비정상열해석한 후 이들의 시간에 따른 최대 온도 변화를

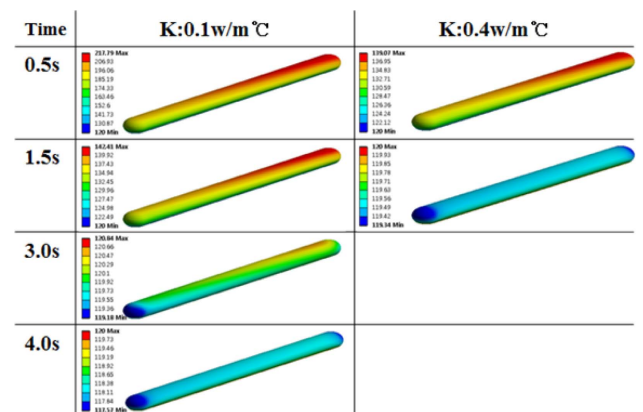


Figure 10. Temperature Distribution for the Thermal Conductivity of Road.

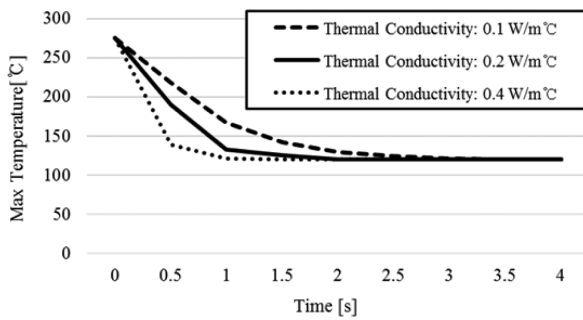


Figure 11. Maximum Temperature in the Road for Thermal Conductivity.

비교한 그래프이다. 세 가지 경우 모두 정상상태의 온도는 베드온도인 120°C로 동일하였다. 그러나 열전도도가 0.1 W/m°C인 경우 정상상태까지 도달하기 까지 약 3.5초가 걸린 반면, 열전도도가 0.4 W/m°C인 경우 약 1.5초 만에 정상상태에 도달하였다. 그래프를 보면 열전도도가 높을수록 온도가 급격히 감소하며 정상상태에 빠르게 도달하고 있음을 알 수 있다.

2. 적층로드의 냉각에 따른 변형

1st Main Simulation (Thermal Transient)으로 얻은 시간에 따른 온도를 이용해 2nd Main Simulation (Transient Structural)

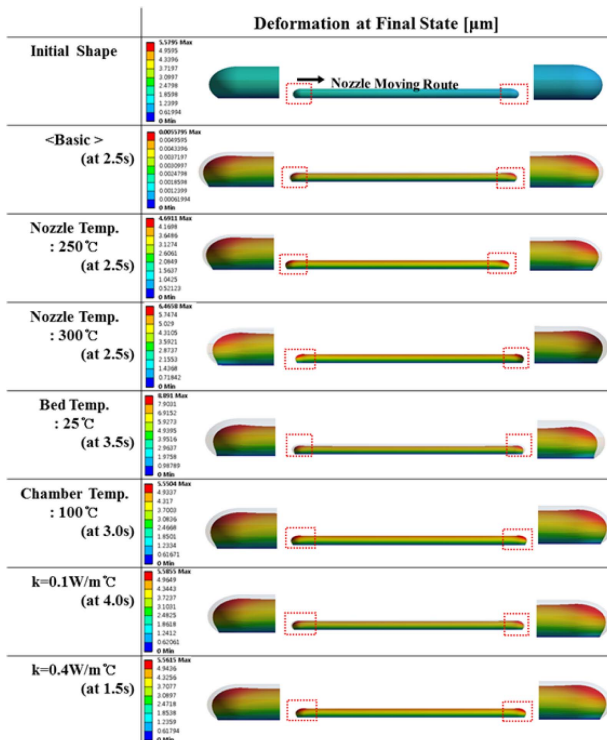
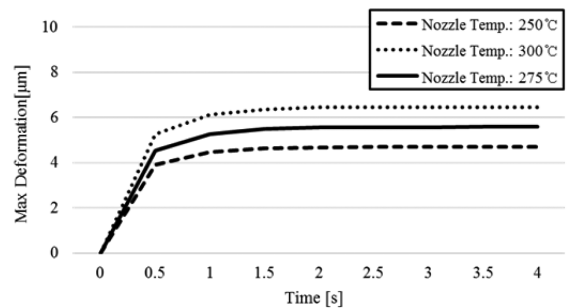


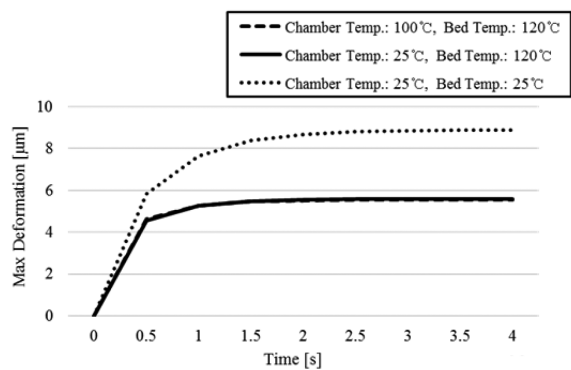
Figure 12. Distribution of Deformation in the Road for Various Printing Conditions.

을 실시하였다. Figure 12는 각 조건 별 비정상해석에서 정상상태까지 도달한 후, 로드가 최대로 변형했을 때의 모습이 나타나 있다. 로드의 양끝 윗면에서 가장 큰 변형이 일어나고 있음을 알 수 있다. Figure 13(a)는 기준조건, 기준조건에서 노즐 온도를 -25°C, +25°C로 변화시킨 경우에서 이들의 시간에 따른 최대 변형량을 비교한 그래프이다. 노즐온도가 300°C인 조건에서 약 6.47 μm 의 가장 큰 변형을 보였다. 노즐온도를 250°C로 가정한 조건에서는 약 4.69 μm 의 가장 적은 변형을 보였다.

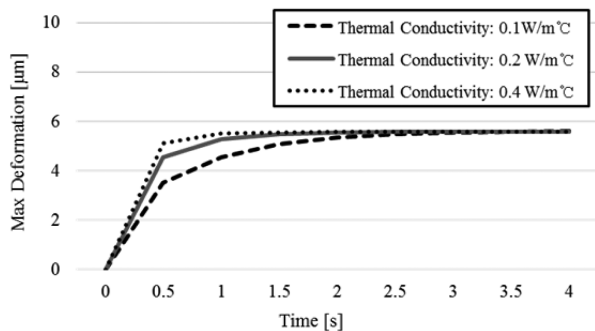
Figure 13(b)는 기준조건, 기준조건에서 챔버온도만 100°C로 높인 경우, 그리고 기준조건에서 베드온도만 25°C로 낮춘 경우에서 이들의 시간에 따른 최대 변형량을 비교한 그래프



(a) For Nozzle Temperature



(b) For Chamber Temperature and Bed Temperature



(c) For Thermal Conductivity of Road

Figure 13. Maximum Deformation in the Road for Various Printing Conditions.

이다. 챔버온도만 올린 경우 변형량은 약 $5.55\ \mu\text{m}$ 로 기준 조건과 비슷한 수준의 변형을 보였으며, 베드온도를 25°C 낮춘 경우에는 $8.89\ \mu\text{m}$ 정도의 높은 변형량을 보였다. 챔버온도와 베드온도가 모두 25°C 로 낮은 경우가 변형이 가장 컸다. 이는 적층 시 챔버온도와 베드온도를 높게 해야 적층물의 치수품질이 좋음을 의미한다. Figure 12를 보면 베드온도를 25°C 로 낮춘 경우 로드와 현저히 수축되는 것을 알 수 있다.

Figure 13(c)는 기준조건과, 기준조건에서 열전도도를 1/2배, 그리고 2배로 변경시킨 경우에서 이들의 시간에 따른 최대 변형량을 비교한 그래프이다. 세 가지 경우 모두 최종상태에서는 $5.56\ \mu\text{m}$ 정도로 최대 변형량은 동일한 수준이었다. 그러나 열전도도가 가장 큰 $0.4\ \text{W/m}^\circ\text{C}$ 인 경우가 가장 빠르게 변형되고 있음을 알 수 있다. Figure 12를 보면 열전도도에 상관없이 최대 변형량은 비슷한 것을 알 수 있다.

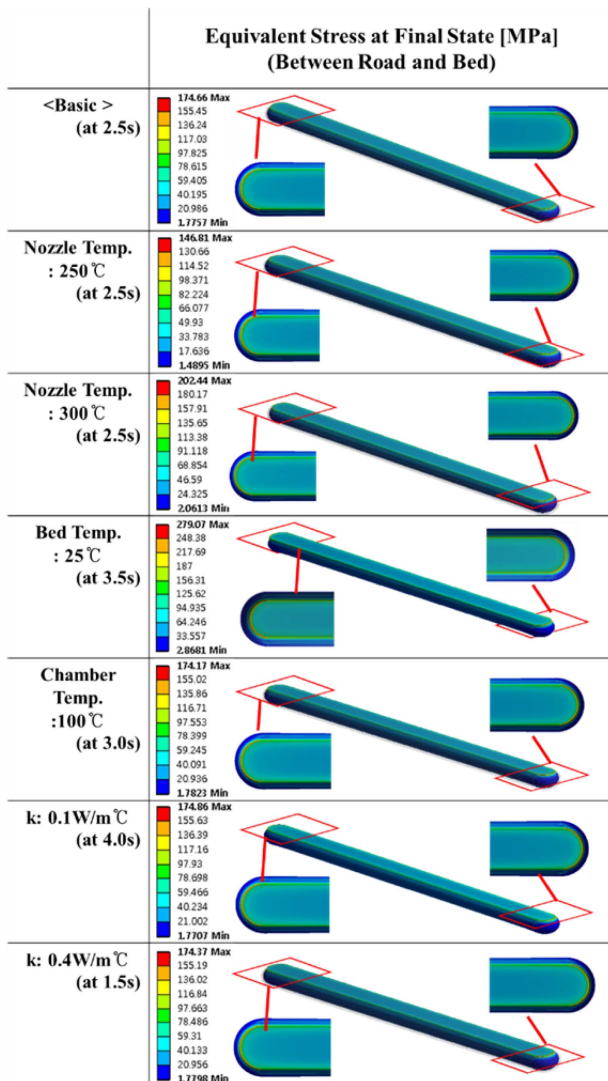
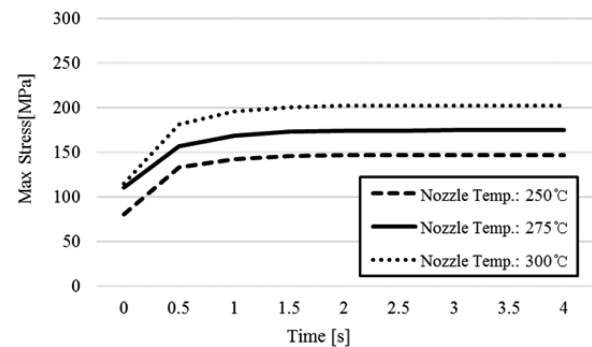


Figure 14. Equivalent Stress in the Road at Bed Interface for Various Printing Conditions.

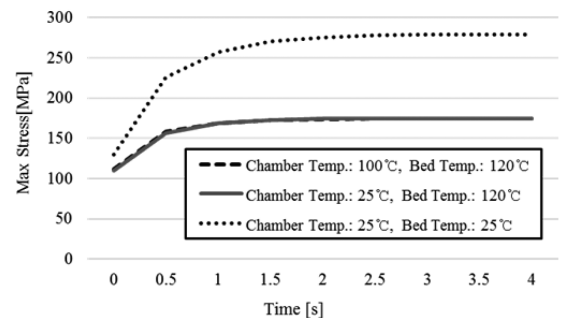
3. 적층로드와 베드사이의 응력

Figure 14는 각 조건 별 비정상 해석결과 최종상태까지 도달한 후 응력을 나타낸 모습이다. 조건에 상관없이 로드와 베드가 맞닿는 면인 로드 바닥면에서, 특히 로드의 양끝에서 가장 큰 변형응력이 발생했음을 알 수 있다. Figure 15(a)는 기준조건, 기준조건보다 노즐 온도를 -25°C , $+25^\circ\text{C}$ 로 변경시킨 경우에서 각 조건 별 발생된 시간에 따른 최대 응력을 비교한 그래프이다. 노즐온도가 300°C 인 조건에서 약 $202.44\ \text{MPa}$ 의 가장 높은 응력을 보였다. 노즐온도가 250°C 인 조건에서는 약 $146.81\ \text{MPa}$ 의 가장 낮은 응력을 보였다. 노즐온도가 높을수록 수축이 커서 응력도 크게 나타났다고 판단된다.

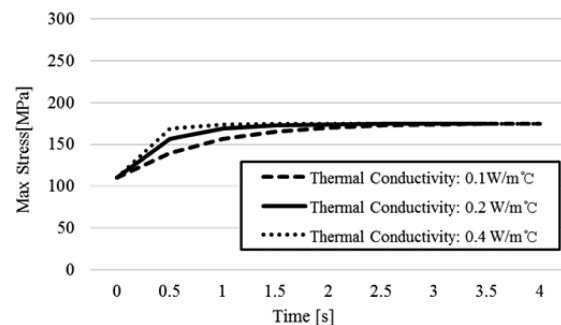
Figure 15(b)는 기준조건, 기준조건에서 챔버온도만 100°C



(a) For Nozzle Temperature



(b) For Chamber Temperature and Bed Temperature



(c) For Thermal Conductivity of Road

Figure 15. Equivalent Stress in the Road at Bed Interface for Various Printing Conditions.

로 높은 경우, 그리고 기준조건에서 베드온도만 25°C로 낮춘 경우에서 이들의 시간에 따른 최대 응력을 비교한 그래프이다. 챔버온도만 올린 경우 최대 응력은 약 174.12 MPa로 기준조건과 비슷한 수준이었으며, 베드온도를 25°C 낮춘 경우에서는 279.06 MPa 정도의 높은 응력을 보였다. 높은 온도의 로드와 25°C의 베드와 만나면 큰 수축이 발생하여 큰 응력값이 나타나게 된 것으로 보인다.

Figure 15(c)는 기준조건과, 기준조건에서 열전도도를 1/2배, 그리고 2배로 변화시킨 경우에서 이들의 시간에 따른 최대 응력을 비교한 그래프이다. 변형량과 마찬가지로 세 가지 경우 모두 174.6 MPa 정도로 최대 응력은 동일한 수준이었다.

Conclusion

본 연구에서는 FDM type 3D printer로 하나의 로드를 80 mm/s의 속도로 적층 할 때 챔버온도, 베드온도, 노즐온도, 그리고 재료의 열전도도에 따른 비정상 열-구조 연계해석을 진행하였다. 챔버온도 25°C, 베드온도 120°C, 노즐온도 275°C, 열전도도 0.2 W/m°C를 기준으로 하나의 변수씩 변화시킬 때, 각 변수가 적층물 변형에 미치는 영향을 분석하였다.

노즐온도에 상관없이 최종변형에 걸리는 시간은 비슷하였으나 변형량은 노즐온도가 높을 수록 증가하는 것을 알 수 있었다. 챔버온도 단독으로는 변형량에 큰 영향을 주지 않았으며, 베드온도가 낮을 때 변형량이 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 챔버온도와 베드온도가 모두 낮은 경우는 변형이 가장 컸다. 따라서 적층물의 변형을 최소화 하기 위해서는 베드와 챔버의 온도를 높게 설정하는 것이 추천된다. 열전도도는 변형량에는 영향을 미치지 않으나 냉각시간에 영향을 주었다. 로드의 양끝에서 최대변형이 발생하여 적층물이 베드에서 이탈 되려는 현상이 예측되었다. 적층물이 베드에서 이탈되지 않도록 하는 장치가 요구된다.

Acknowledgments

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행 되었습니다.

References

- Sehwan Park, "3D Printing Industry Trends", *International Journal of Advanced Culture Technology*, **2**, 30 (2014).
- Thierry Rayna, Ludmila Striukova, "From Rapid Prototyping to home Fabrication: How 3D Printing is Changing Business Model Innovation", *Technological Forecasting & Social Change*, **102**, 214 (2016).
- Sangho Lee, "Prospect for 3D Printing Technology in Medical, Dental, and Pediatric Dental Field", *Journal of the Korean Academy of Pediatric Dentistry*, **43**, 93 (2016).
- ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2013).
- Wonhui Kim, "Design of an Abnormal Output Status Detection Module for the Material Extrusion 3D Printer", Master's Thesis at University of Korea Polytechnic, Gyeonggi (2015).
- Gidae Kim and Jungyun Kim, "Benchmark Study on Surface Roughness and Mechanical Properties of Rapid Prototypes", *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, **15**, 56 (2006).
- Anoop Kumar Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts.", *Materials and Design*, **31**, 287 (2010).
- Syed H. Masood, Kalpeshkumar Mau, and W. Q. Song, "Tensile Properties of Processed FDM Polycarbonate Material", *Material Science Forum*, **654**, 2556 (2010).
- Alan G. Leacock, Gramham Cowan, Mark Cosby, Gregor Volk, David McCracken, and Desmond Brown, "Structural and Frictional Performance of Fused Deposition Modelled Acrylonitrile Butadiene Styrene (P430) with a view to use as Rapid Tooling Material in Sheet Metal Forming", *Key Engineering Materials*, **639**, 325 (2015).
- Daekeon Ahna, Jin-Hwe Kweon, Soonman Kwon, Jungil Song, and Seokhee Lee, "Representation of surface roughness in fused deposition modeling", *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 5593 (2009).
- IPENG Anhua, "Research on the Interlayer Stress and Warp-age Deformation in FDM", *Advanced Materials Research*, **538**, 1564 (2012).
- Tian-Ming Wang, Jun-Tong Xi, and Ye Jin, "A model research for prototype warp deformation in the FDM process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **33**, 1087 (2007).
- H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, "Melt flow behaviour of poly-ε-caprolactone in fused deposition modelling", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **19**, 2541 (2008).
- S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M.-Y. Lyu, "Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer", *Polymer(Korea)*, **40**, 1 (2016).
- C. Gosselin, R. Duballet, Ph. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, and Ph. Morel, "Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders", *Materials and Design*, **100**, 102 (2016).
- Kyoung-Seok Noh, Hae-Won Seo, Tae-Young Kim, and Yong-Gu Lee, "Development of a G-Code generator for color gradation generations in a mixing chamber FDM 3D print-

- ers”, *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, **22**, 10 (2017).
17. Jung Hyun Park, Min-Young Lyu, Soon Yong Kwon, Hyung Jin Roh, MyungSool Koo, and Sung Hwan Cho, “Temperature analysis of nozzle in a FDM type 3D printer through computer simulation and experiment”, *Elastomers and Composites*, **51**, 301 (2016).
18. Seong Yeol Park, Gang Hyuck Rhee, Yun Hyo Nam, and Min-Young Lyu, “Structural Stability Study Using Thermal and Structural Analysis of a Bimetal Cylinder in an Injection Molding Machine”, *Polymer(Korea)*, **39**, 775 (2015).
19. Frank P. Incropera, David P. DeWitt, Theodore L. Bergman, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, WILEY (2006).