



3D 프린터의 고온 압출부 설계를 위한 열-구조 연계 수치해석

Team: Hot END

2019023763 장원

2019048177 김지현

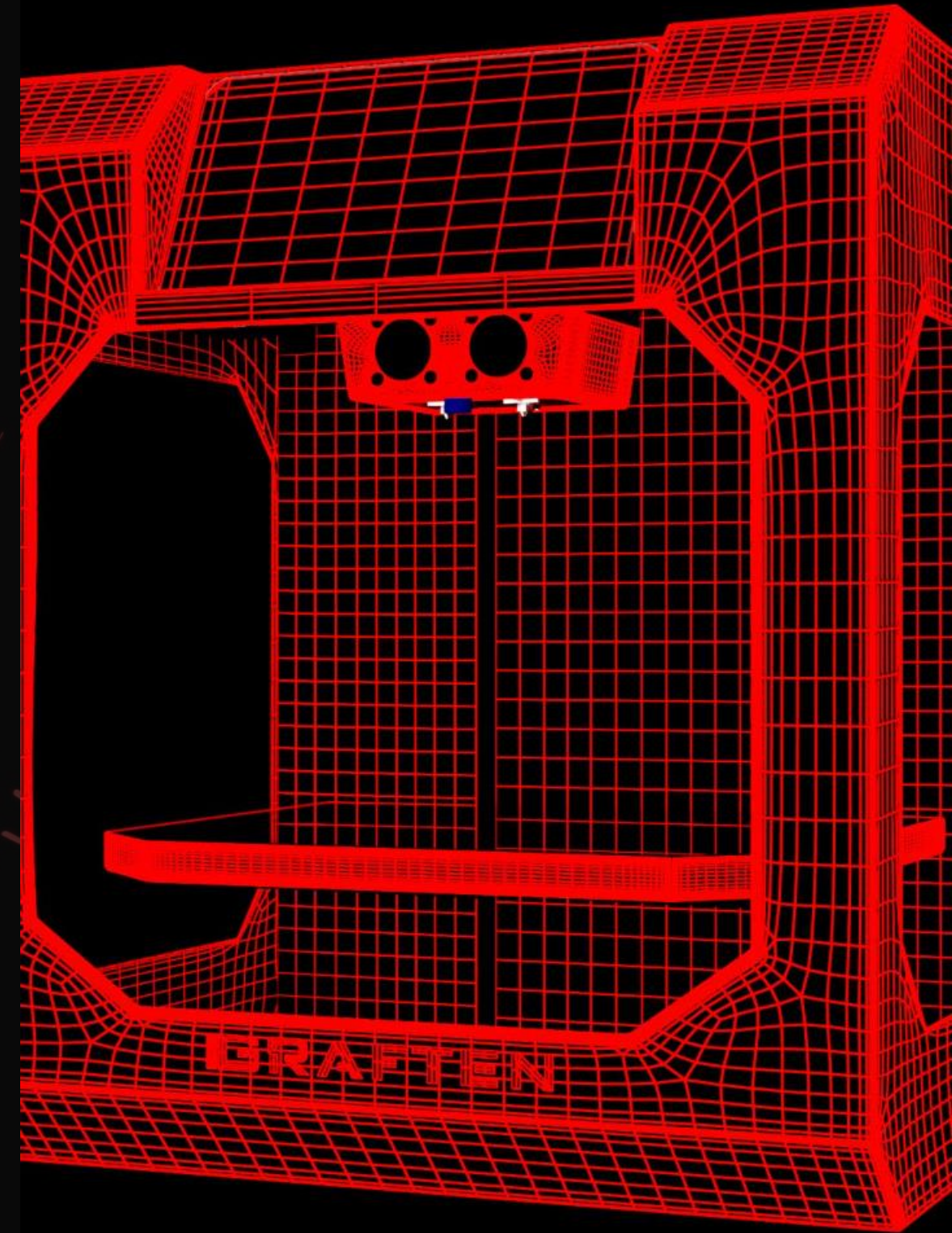
목차

	1	프로젝트 주제 선정 이유
하트 엔드 소개	2	
	3	이론적 배경
모델링 설명	4	
	5	방열핀 개수에 따른 열 특성 수치해석
열 차단부 두께에 따른 열특성 및 응력 수치해석	6	
	7	결론

주제 선정 동기

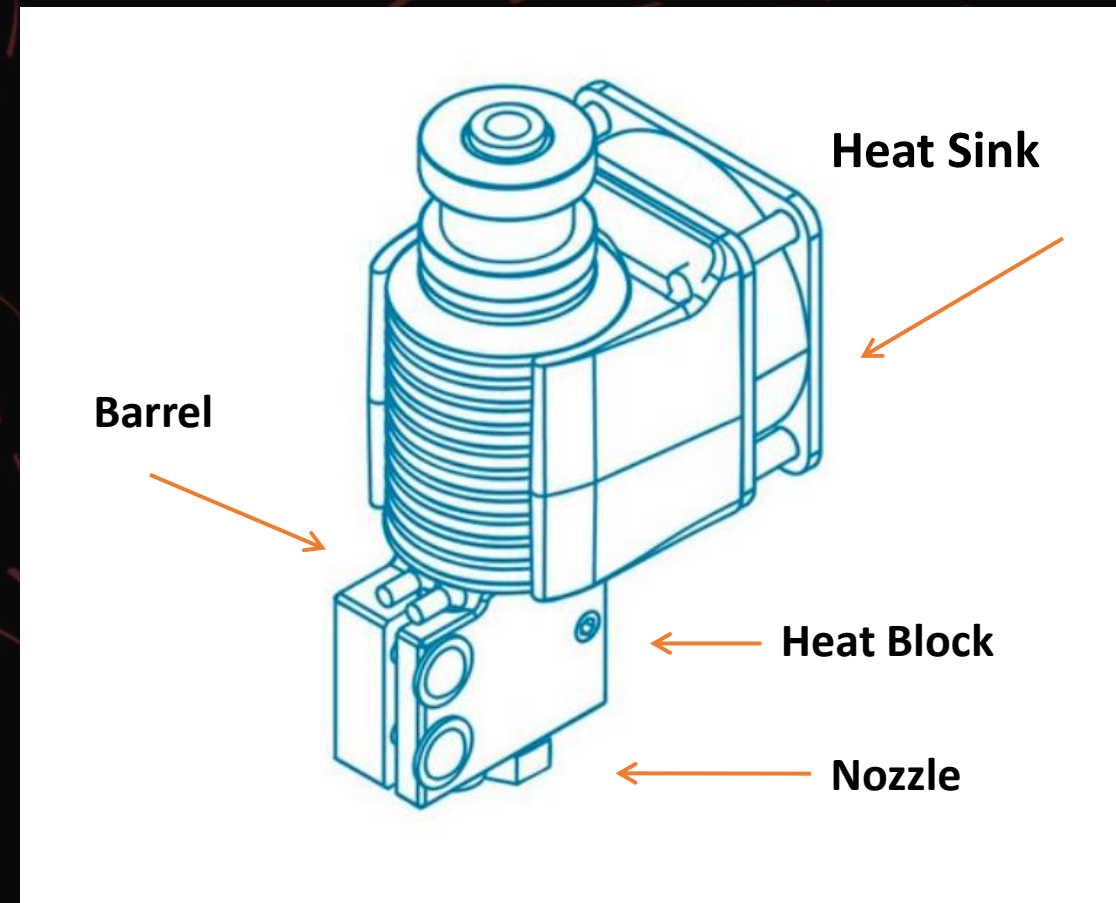
Solid Mechanics & Heat Transfer

이 두 가지를 함께할 수 있는 모델을 찾던 중, CAD수업 때 배웠던 3D프린터와 자공실 생산 분야 에서 했던 사출성형을 기반으로 3D프린터의 고온 압출부를 주제로 선정하였습니다.
저희는 그 중에서도 FDM 3D 프린터의 HOT END 설계를 목표로 잡았습니다.



핫엔드란?

- 3D 프린터에서 원재료를 압출하는 부분을 말하며 노즐과 가열장치(Heat Block)와 Barrel, Heat sink로 이루어져 있습니다.
- 필라멘트의 이동 및 푸시 역할을 하며, 필라멘트를 압축하여 정확한 양을 녹이는 것이 중요
- 처음에 히팅 블록에 전류가 흐르면서 히팅 블록이 달궈지기 시작합니다.
- 이후 노즐이 히팅 블록의 열을 전달받아 뜨거워지고, 이로 인해 필라멘트가 녹아서 노즐로 흐르게 됩니다
- 상단부는 Heat break와 Heat sink (방열판) 구조를 통해 고온으로 유지되는 영역을 최소화시킬 수 있다



- 3D 프린팅하며 Heat sink
- 필라멘트 필라멘트 것이
- 히팅 볼 달귀지
- 이내 보 뜨거워 구멍의
- Heat sink 고온의



이번 프로젝트에서는
영국의 E3D V6 HOT END
제품을 기반으로
모델링 하였습니다.

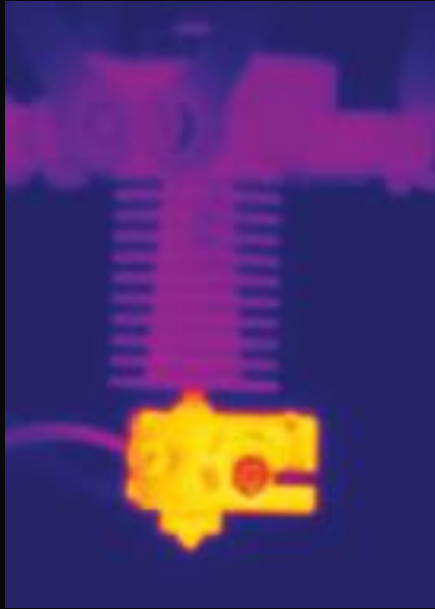


eat Sink

- **Heat Block**

– Nozzle

프로젝트 이론적 배경

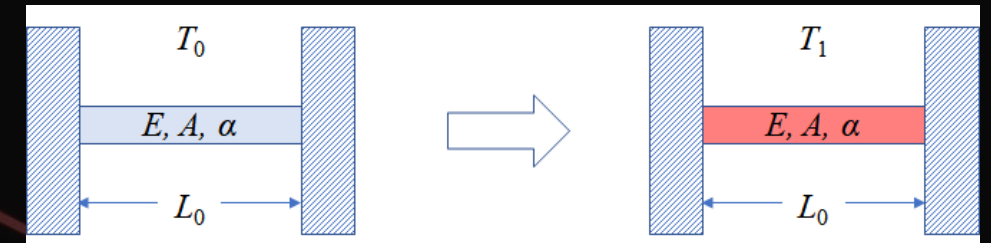
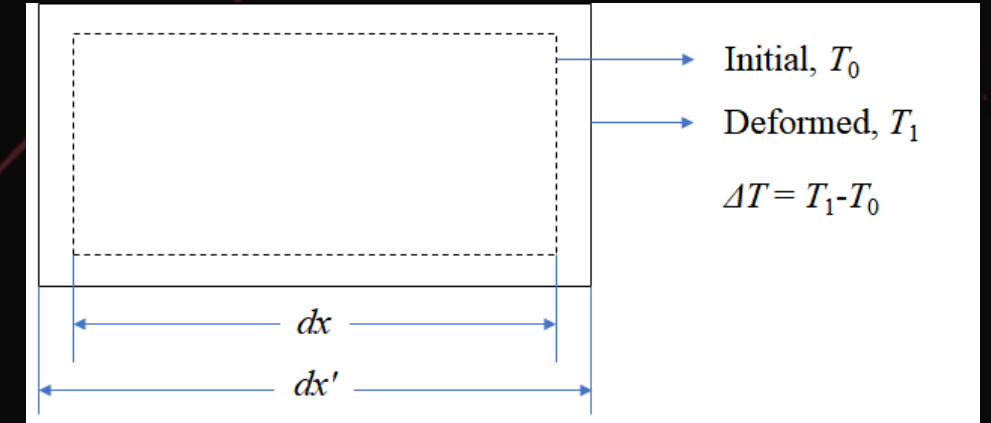


$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} + \dot{Q}_y - \dot{Q}_{y+\Delta y} + \dot{Q}_z - \dot{Q}_{z+\Delta z} + \underbrace{\dot{e}_{gen}\Delta x\Delta y\Delta z}_{\dot{E}_{gen,box}} = \underbrace{\frac{\rho\Delta x\Delta y\Delta z}{\Delta t} c(T_{t+\Delta t} - T_t)}_{\frac{\Delta E_{box}}{\Delta t}}$$

$$-\frac{1}{\Delta y\Delta z}\frac{\partial}{\partial x}\left(-k\Delta y\Delta z\frac{\partial T}{\partial x}\right) - \frac{1}{\Delta x\Delta z}\frac{\partial}{\partial y}\left(-k\Delta x\Delta z\frac{\partial T}{\partial y}\right) - \frac{1}{\Delta x\Delta y}\frac{\partial}{\partial z}\left(-k\Delta x\Delta y\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \dot{e}_{gen} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

- a. Steady state: $\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \nabla^2 T + \frac{\dot{e}_{gen}}{k} = 0$
- b. No heat generation: $\dot{e}_{gen} = 0, \nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$
- c. Steady state, no heat generation: $\frac{\partial T}{\partial t} = \dot{e}_{gen} = 0, \nabla^2 T = 0$



$$\sigma_T = \frac{F}{A} = -E\alpha\Delta T$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -KA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Δt = 단위 시간
 ΔT = 두 물체의 온도 차
 x = 거리

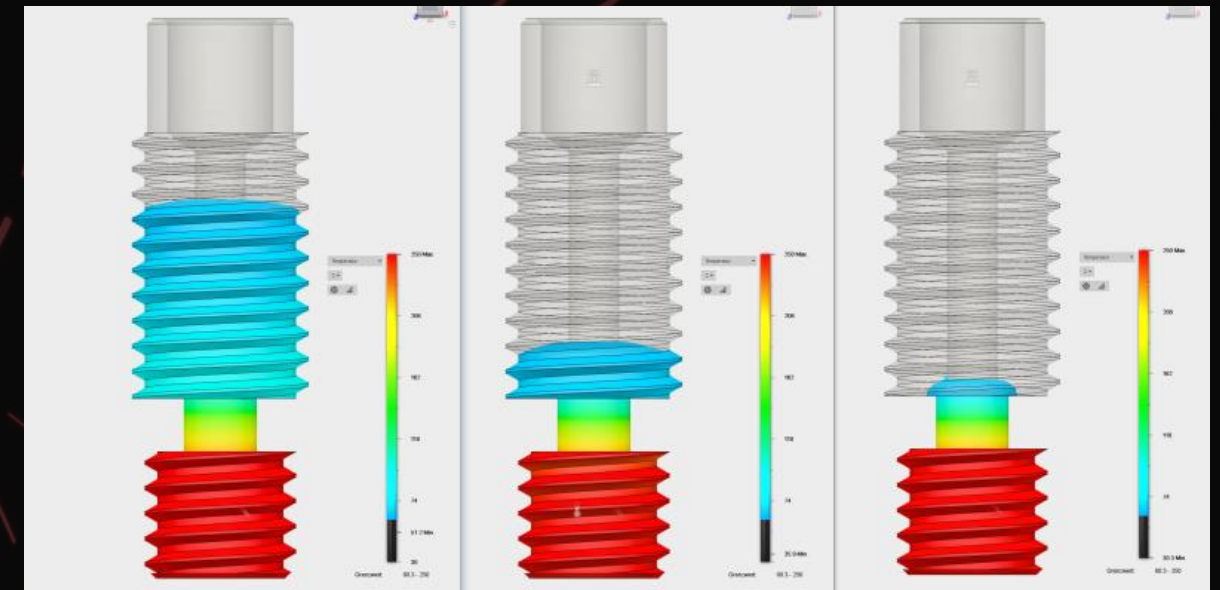
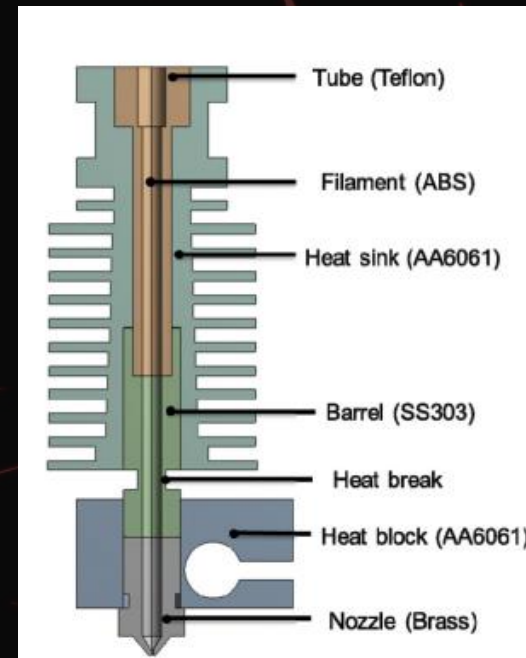
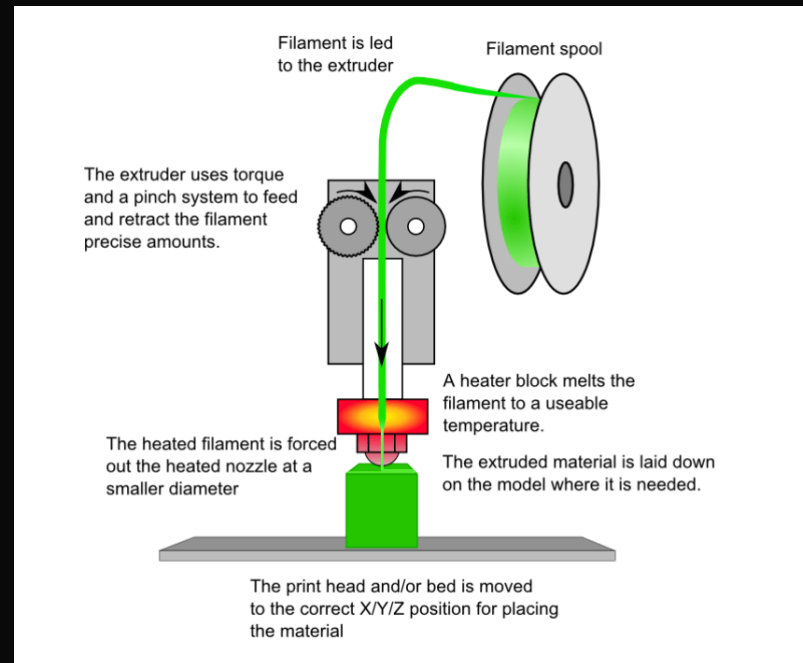
ΔQ = 전도되는 열량
 A = 접촉된 단면적

푸리에의 법칙(열전도 법칙)

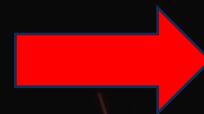
푸리에의 법칙을 통한
열전도 방정식 간소화

열 팽창으로 인해 발생하는 응력

모델링 가설 설정 소개



- 필라멘트 → 고체
- 녹은 필라멘트 → 유체
- 녹은 부분이 많아질수록 → 요구 압력 증가



- 필라멘트가 노즐에서만 녹고 노즐 이외의 구역에서는 녹지 않아야 한다.
- 기준점 → HEAT BREAK
- 고온부와 저온부로 **급격하게** 나뉘수록 좋다.

모델링 가설 설정 소개

이상적인 핫 엔드 모델링을 위한 조건들

전도되는 열량은 단면적에 비례하기 때문에
Heat break의 두께를 줄일수록 고온구간과
저온구간을
급격하게 나눌 수 있다.

저온부에 해당하는
HEAT SINK(방열판)의 표면적을 늘려
저온부의 냉각효과를 높임

VS.

Heat break의 두께를 줄일수록
응력 발생증가
→항복점을 넘어 소성변형 가능성이 생김

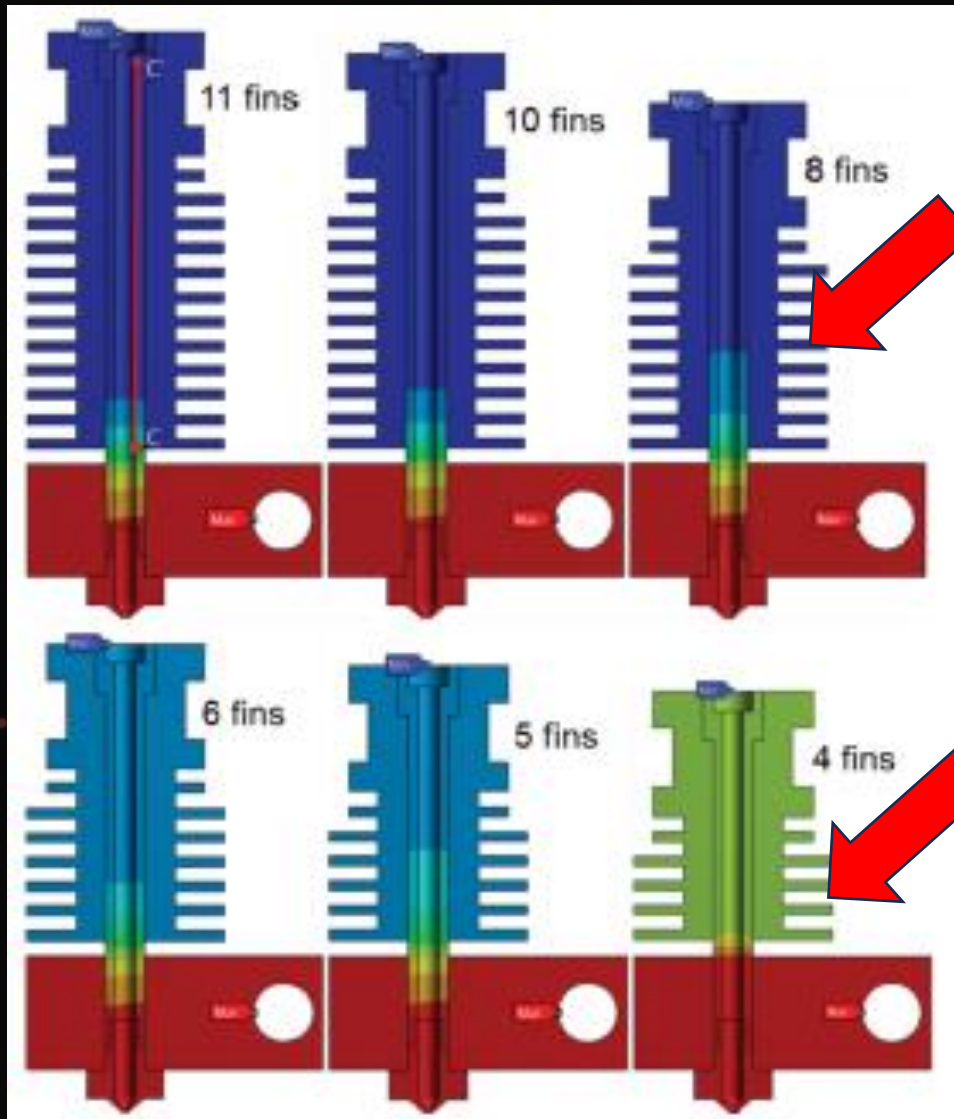
VS.

HEAT SINK(방열판)의 표면적을
늘리는것(방열핀의 개수를 증가) 시키는 것은
물리적인 한계나 비용적인 한계가 존재함.

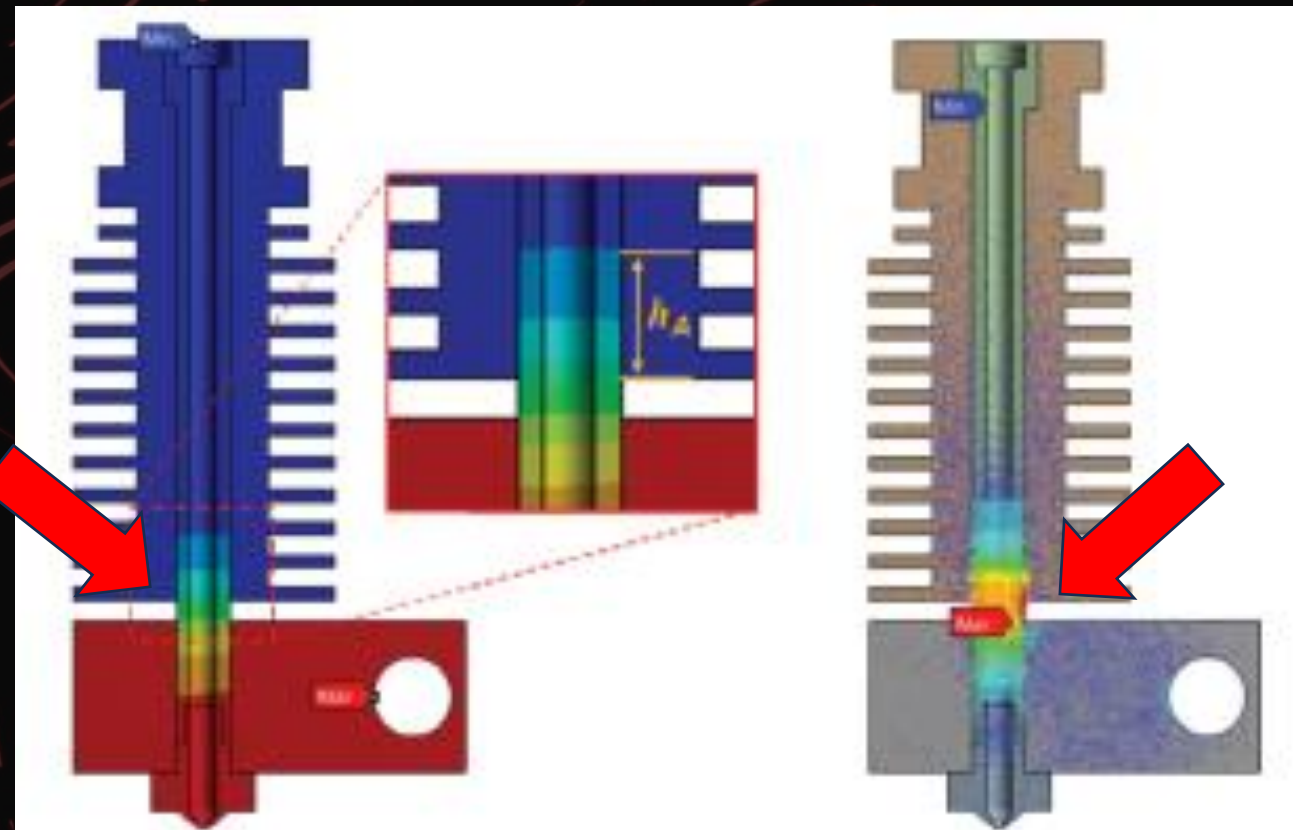
COMSOL을 통한 시뮬레이션을 통해 최적의 설계점을 찾기로 결정 !!

핫엔드 모델링 소개

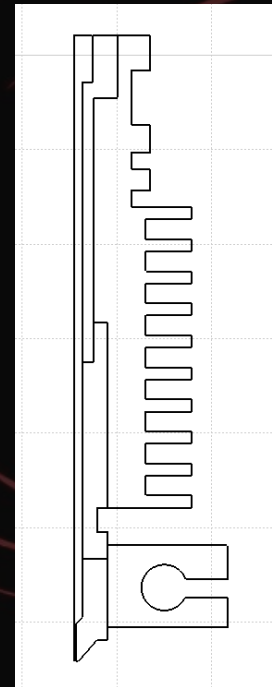
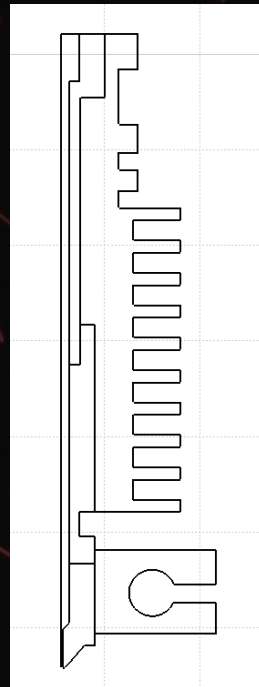
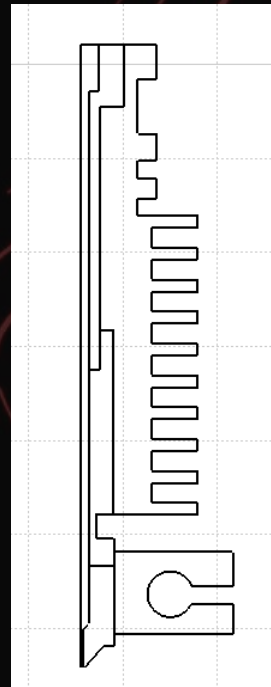
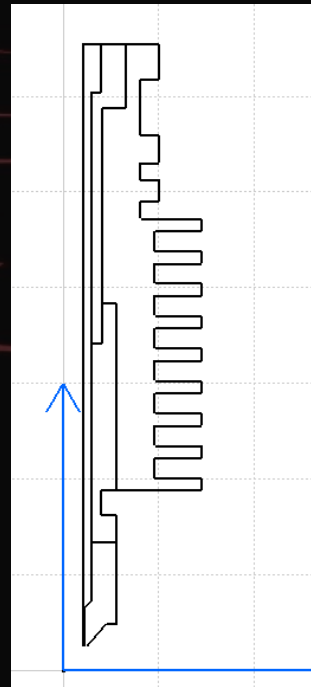
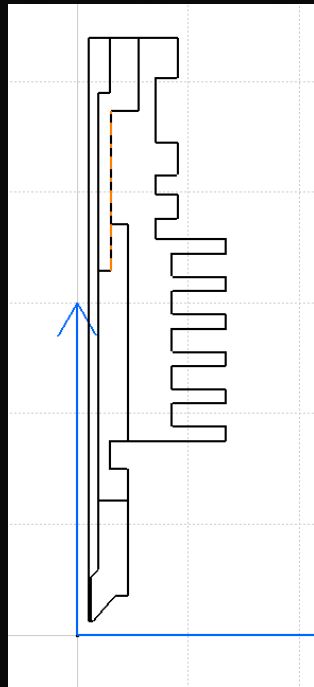
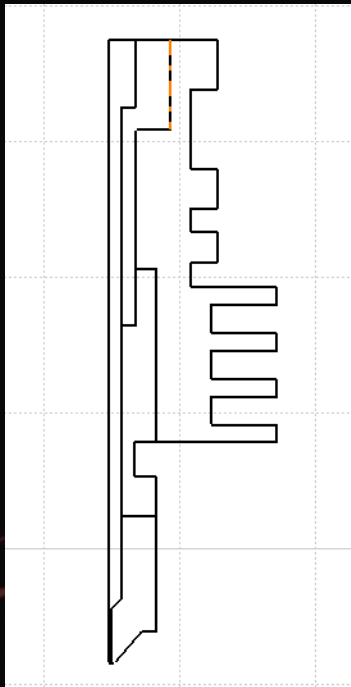
방열핀의 개수에 따라 달라지는 해석



열 차단부의 두께에 따라 달라지는 해석



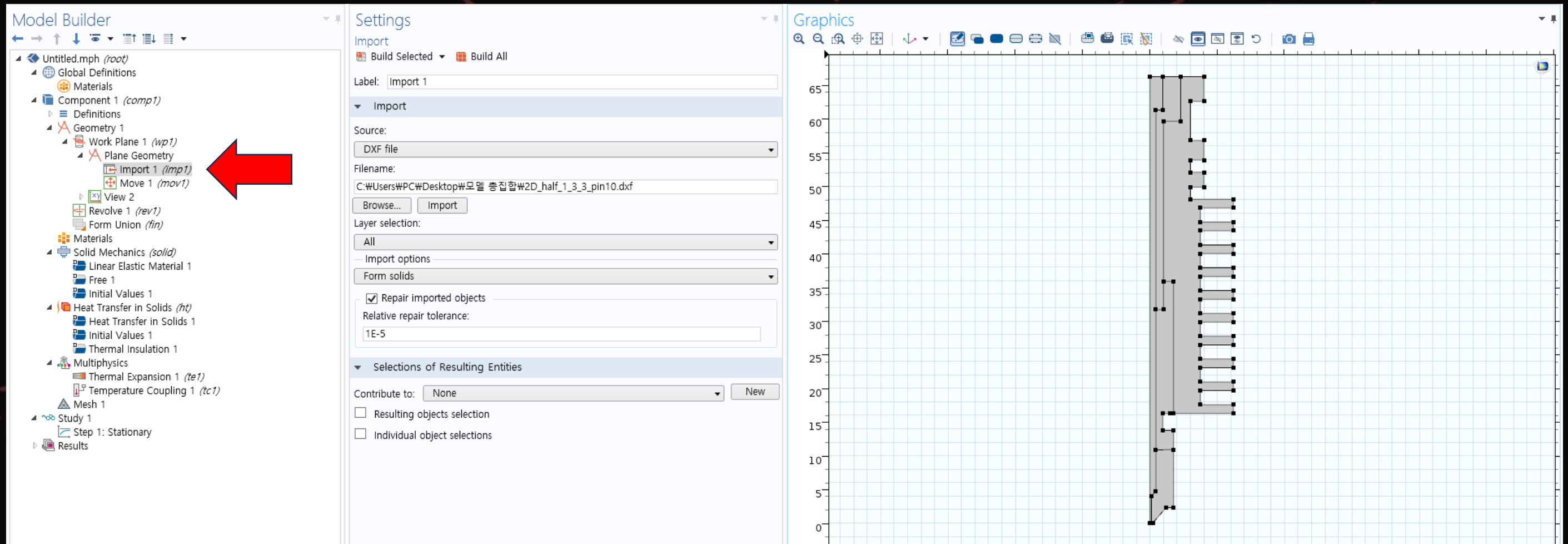
핫엔드 모델링 소개



이름	유형
2D_half_1_3_3_pin4.dxf	DXF 파일
2D_half_1_3_3_pin6.dxf	DXF 파일
2D_half_1_3_3_pin9.dxf	DXF 파일
2D_half_1_3_3_pin10.dxf	DXF 파일
2D_half_1_r_0.75_1.dxf	DXF 파일
2D_half_1_r_1.00_REWISE2_Without5.dxf	DXF 파일
2D_half_1_r_1.5_revise4.dxf	DXF 파일
2D_half_1_r_1.25_2.dxf	DXF 파일

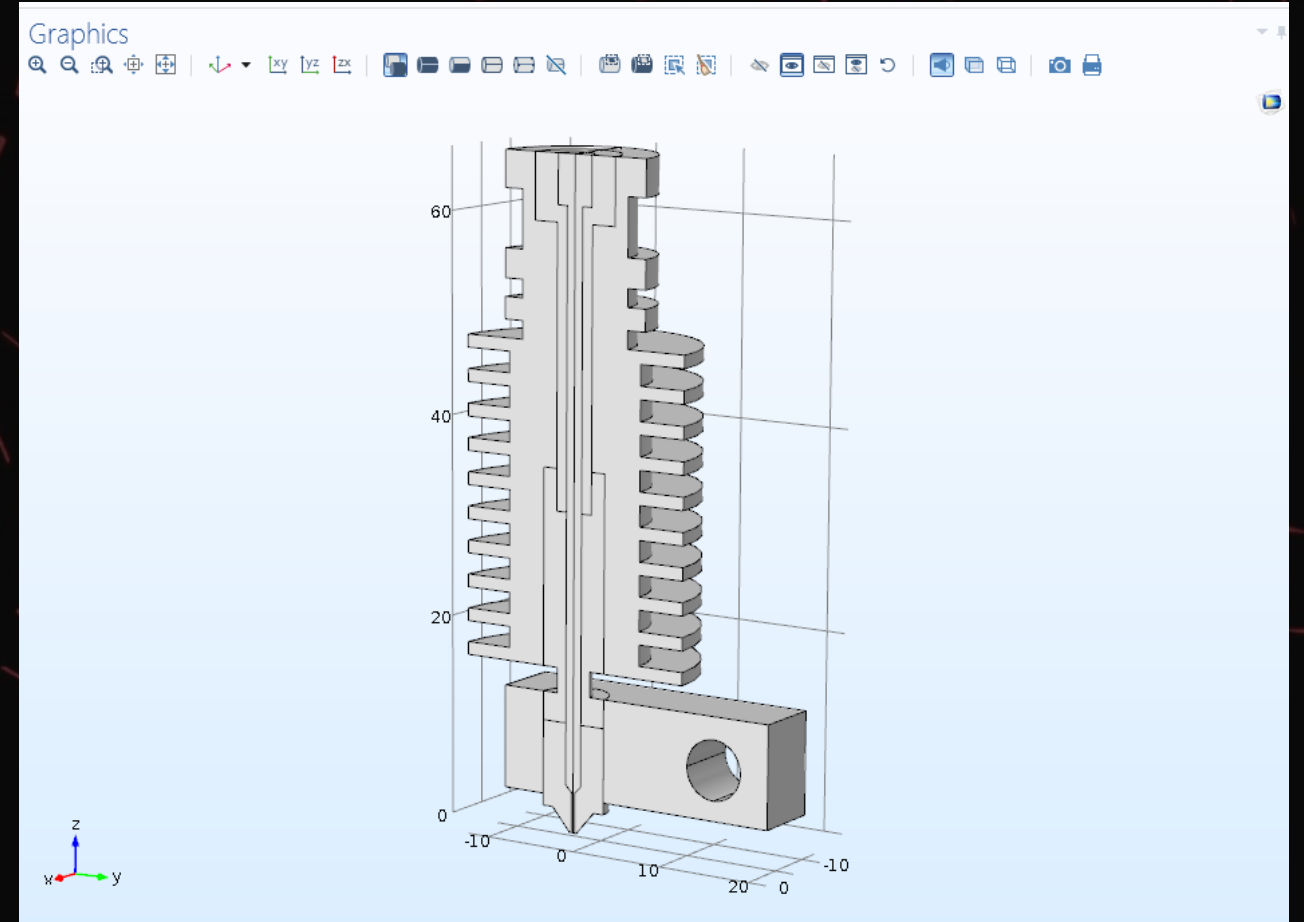
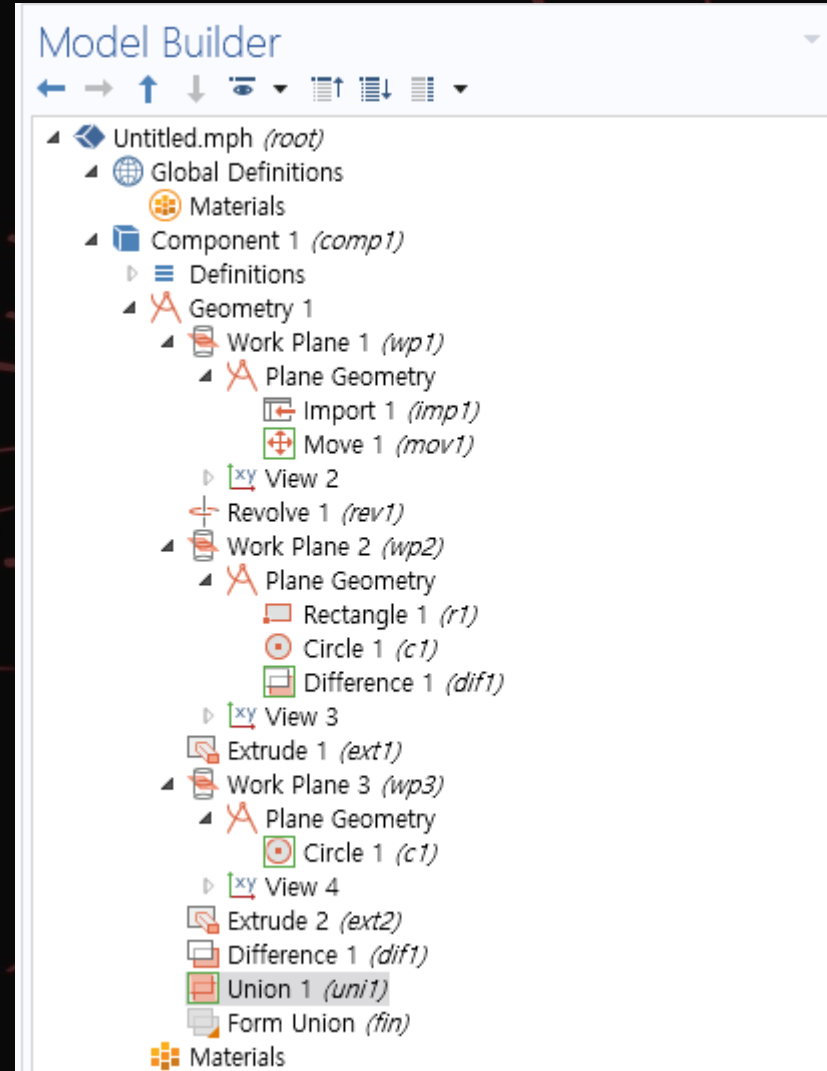
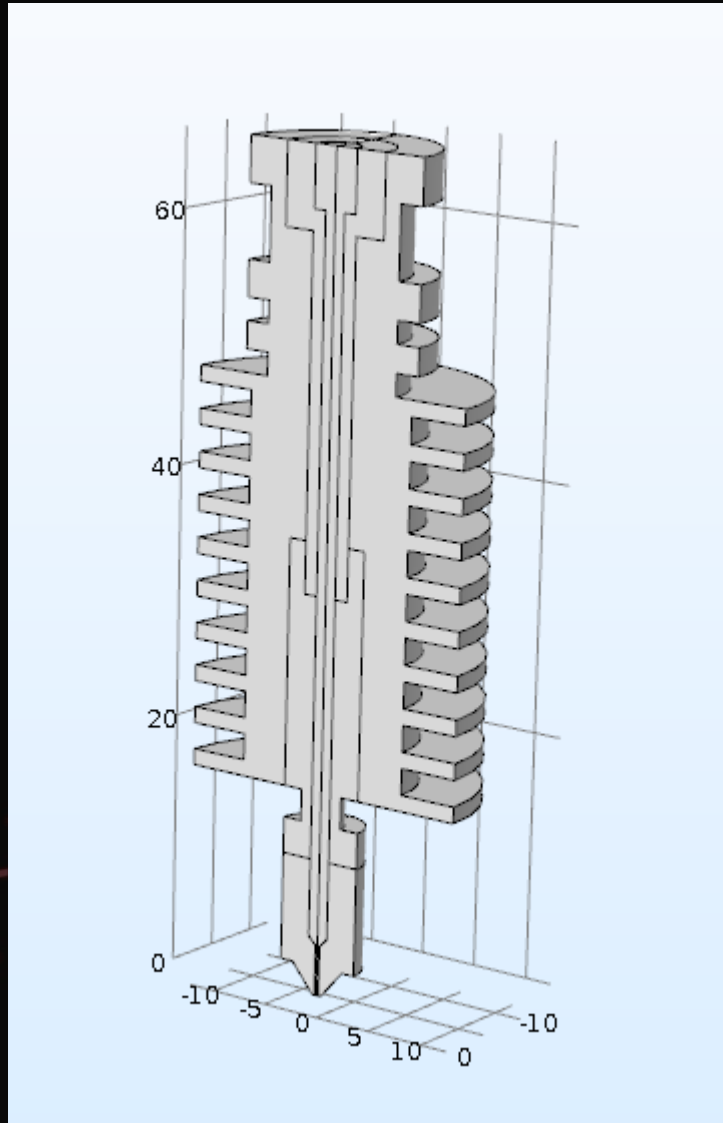
CATIA로 모델링 제작 후 COMSOL에 Import 하기 위해 Drafting에서 .dxf 파일로 저장

핫엔드 모델링 소개



3D 에서 Work Plane 생성 → import

핫엔드 모델링 소개



Import 파일을 회전시킨뒤 새로운 Work plane에 Heat Block 제작

핫엔드 모델링 소개

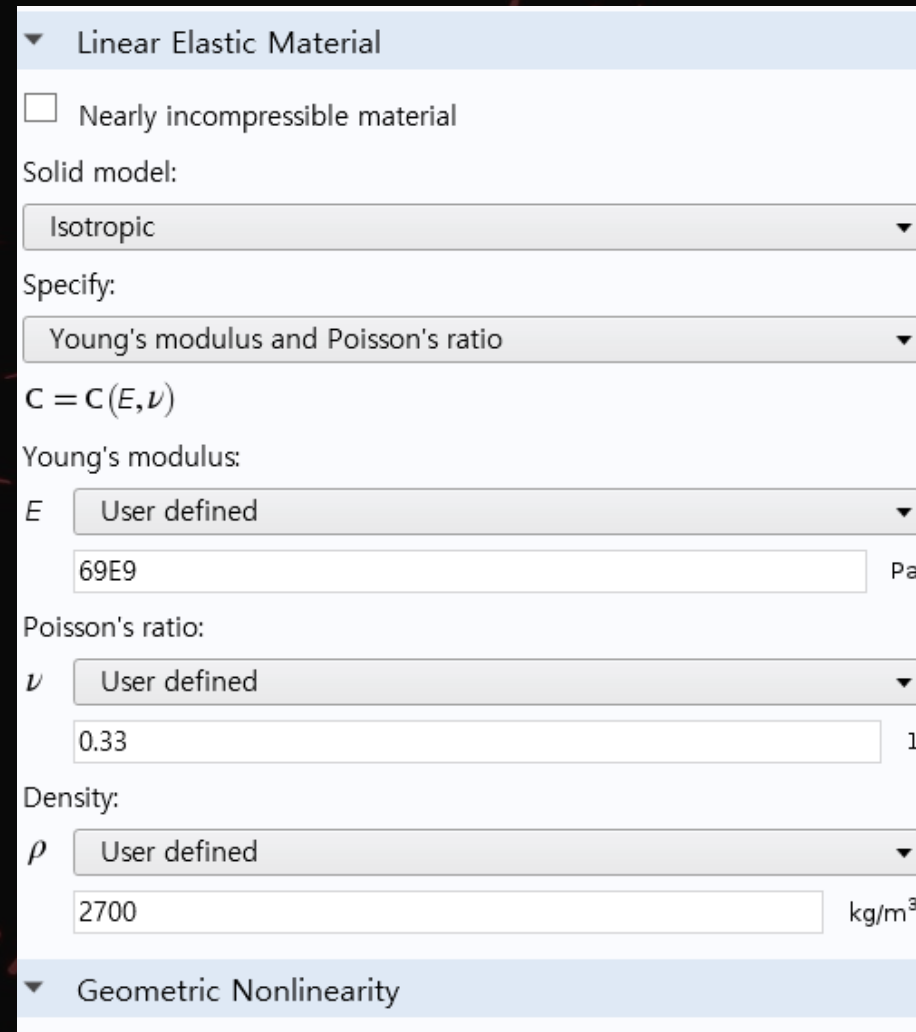
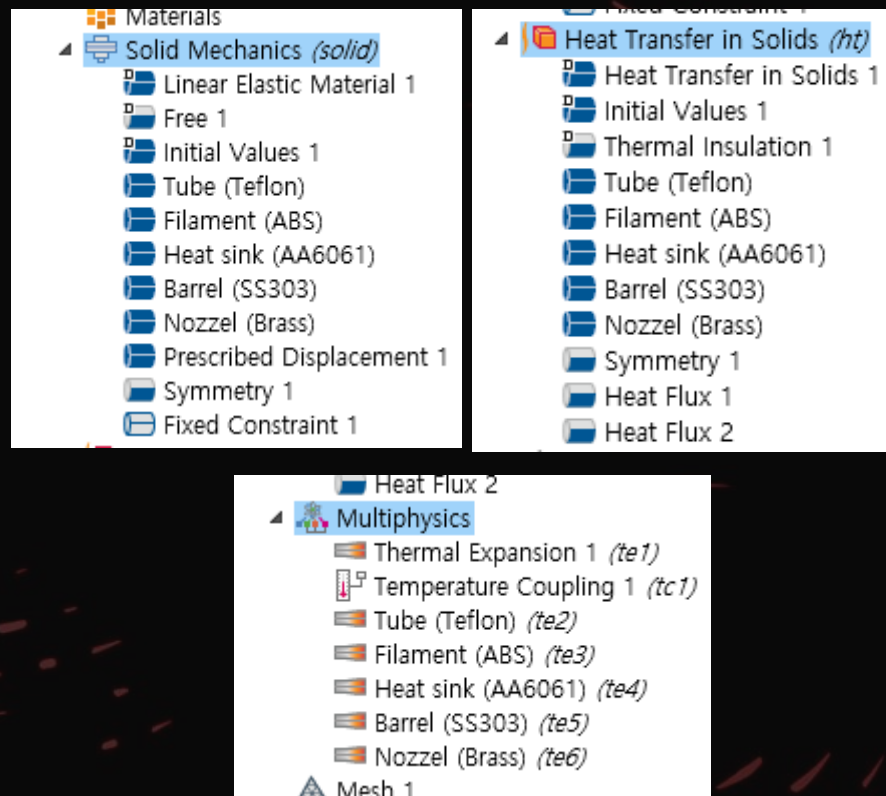
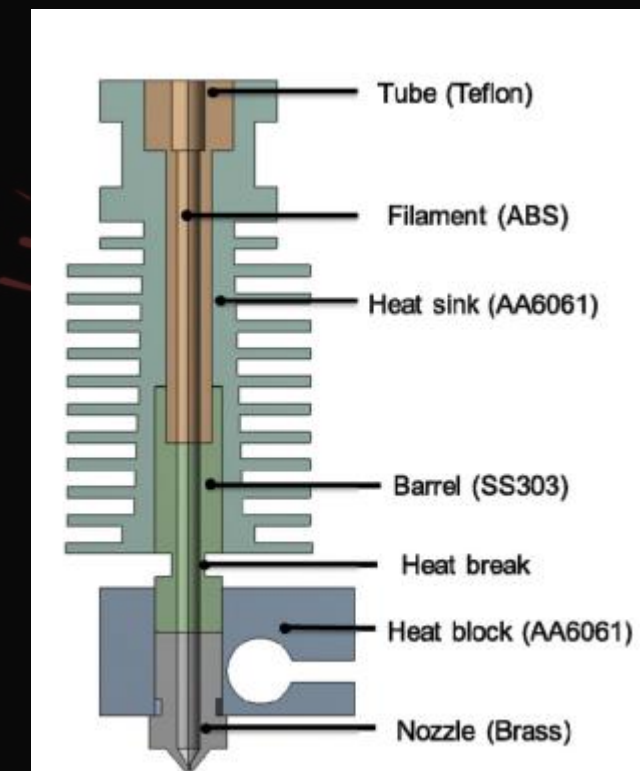


Table 1 Physical properties of the extruder components

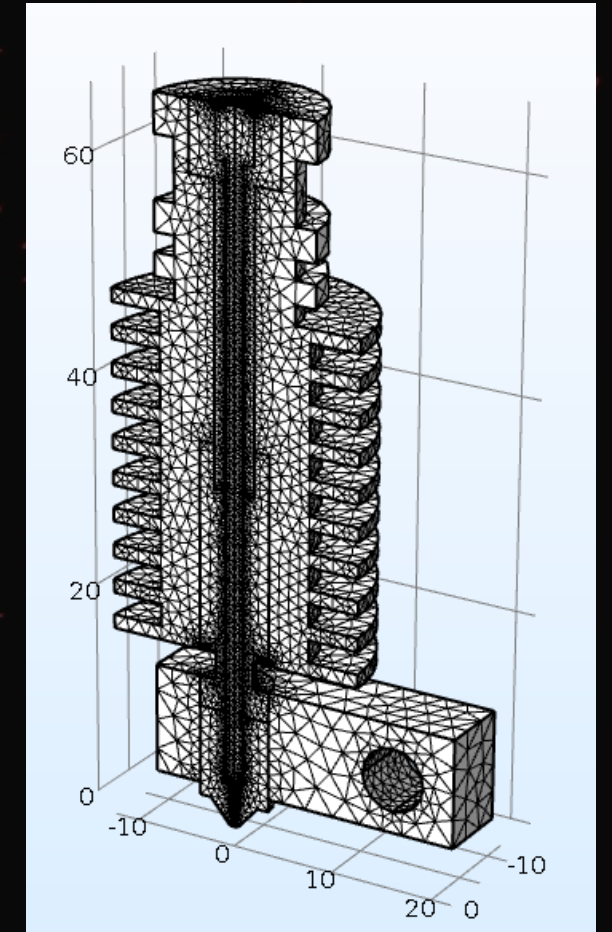
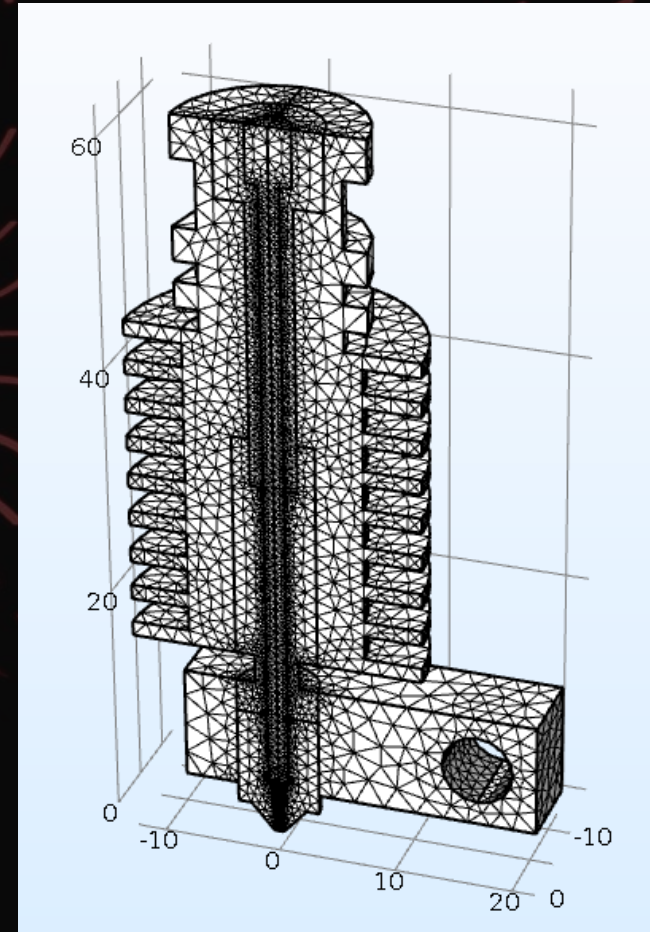
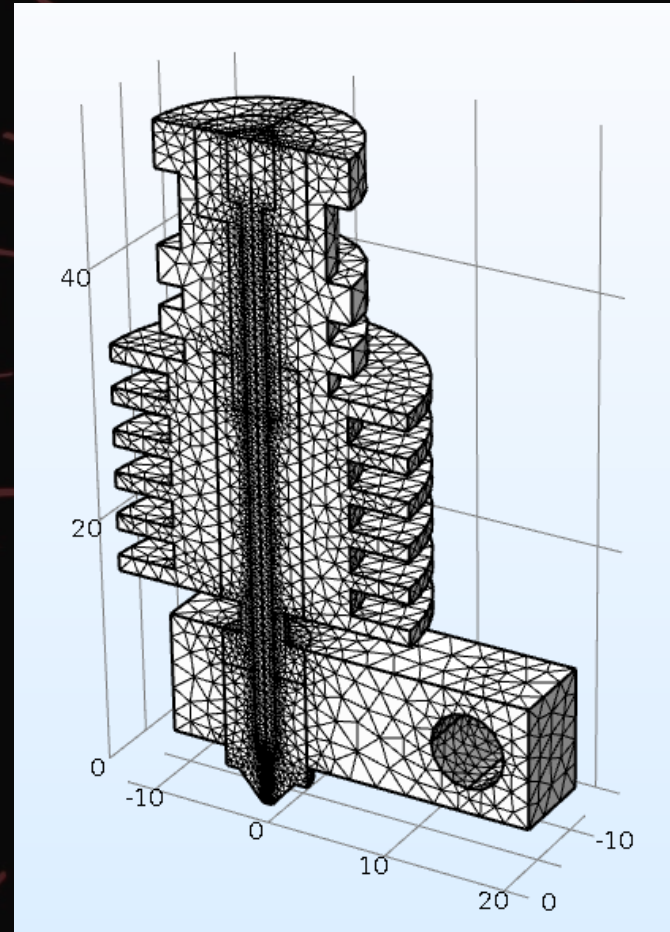
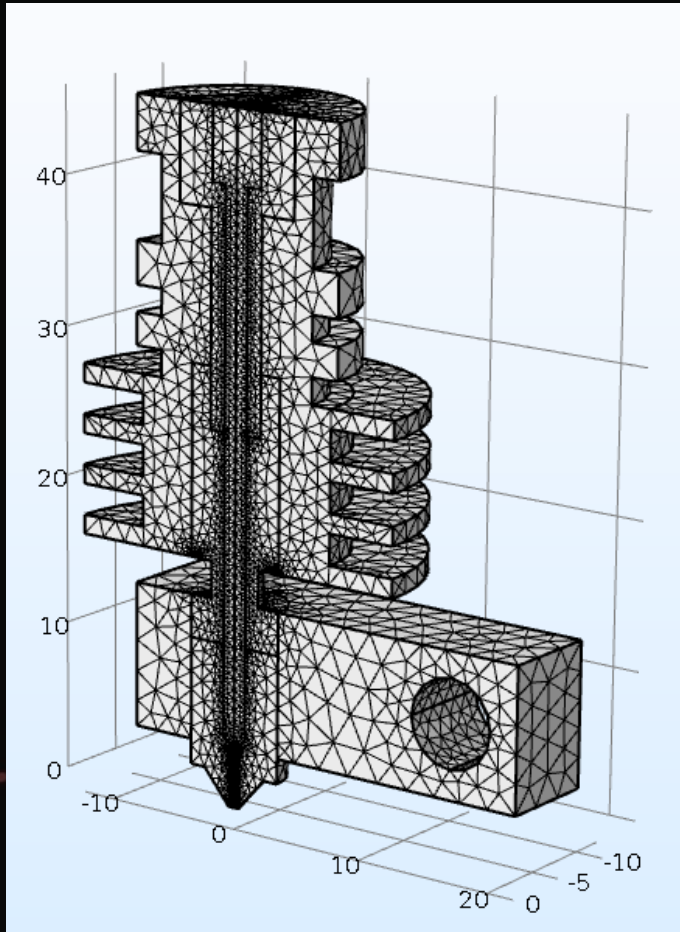
Material	E (GPa)	ν	α (10 ⁻⁵ /C)	k (W/m-K)
Teflon	1.80	0.46	11.2	0.35
ABS	2.83	0.35	9.0	0.216
AA6061	69	0.33	2.3	170
SS303	193	0.25	1.73	16.3
Brass	96.5	0.31	2.05	116



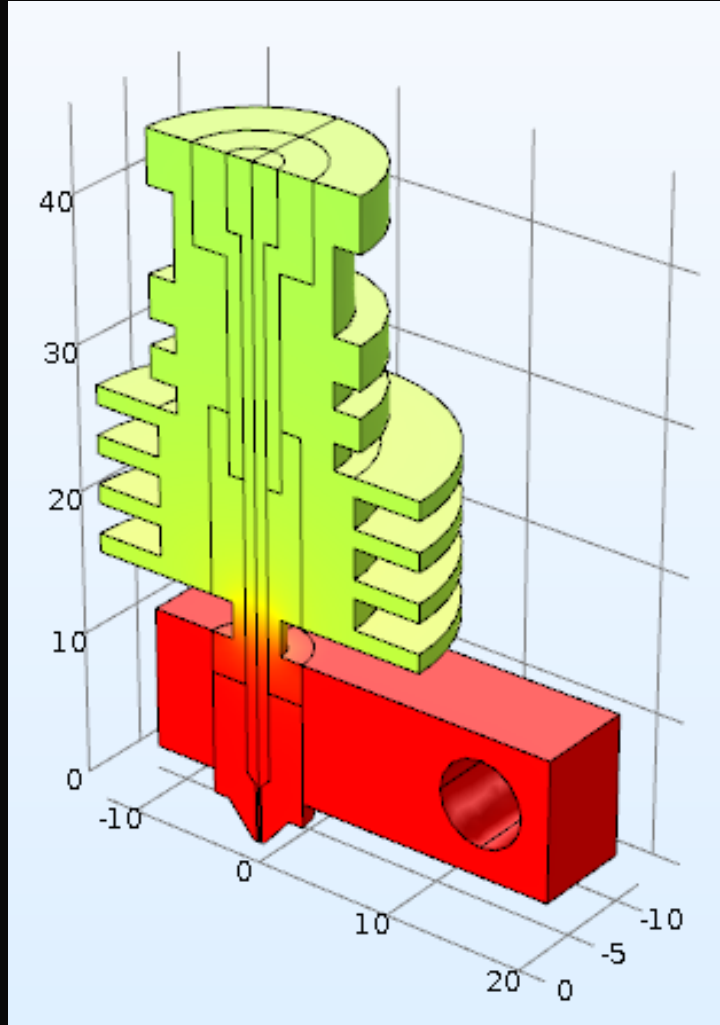
참조한 논문과 E3D V6모델을 기반으로 물성 작성

핀 개수에 따른 열 특성 수치해석

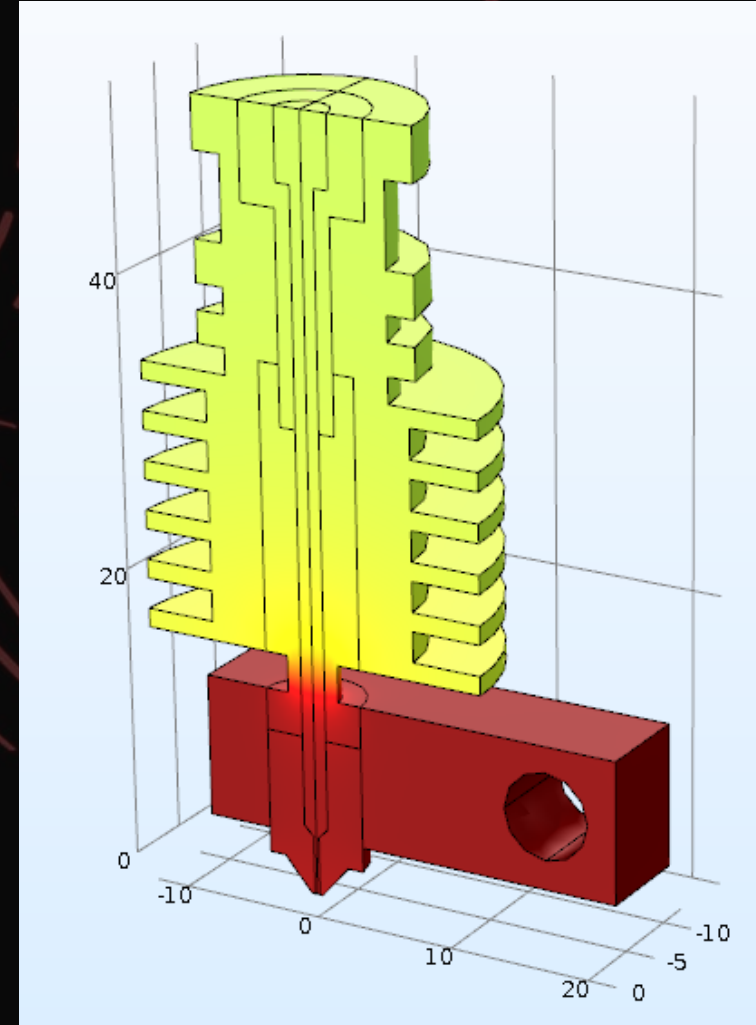
핫엔드 핀 개수에 따른 열해석



핫엔드 핀 개수에 따른 열해석

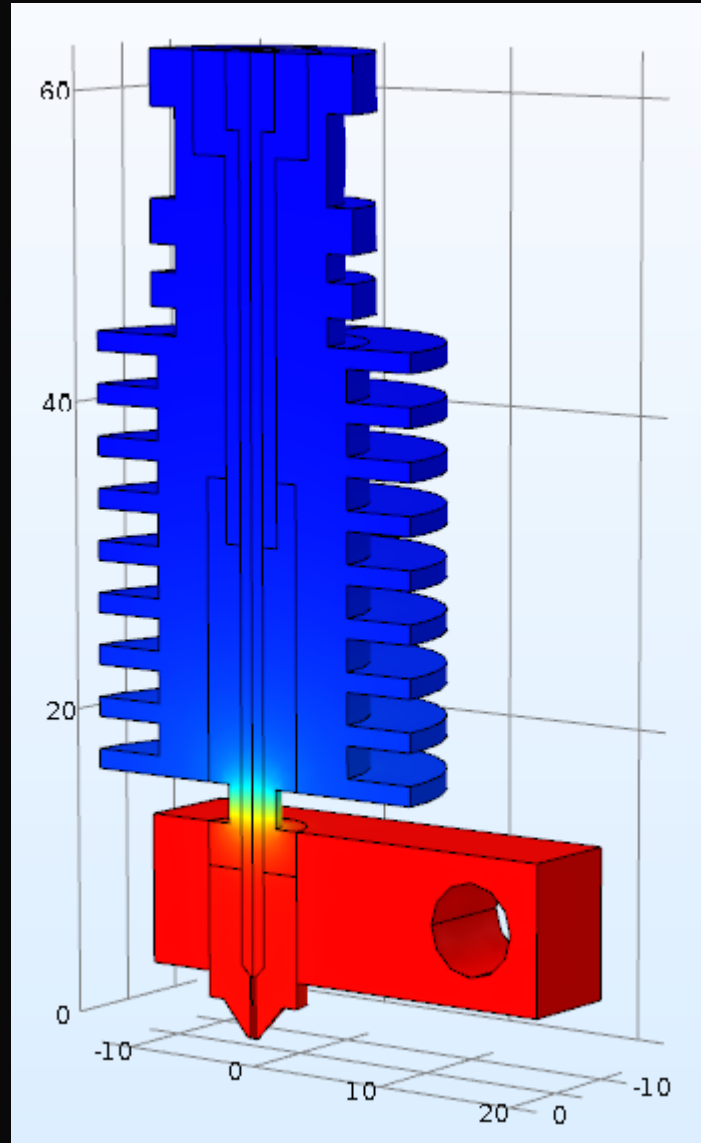


핀 4개

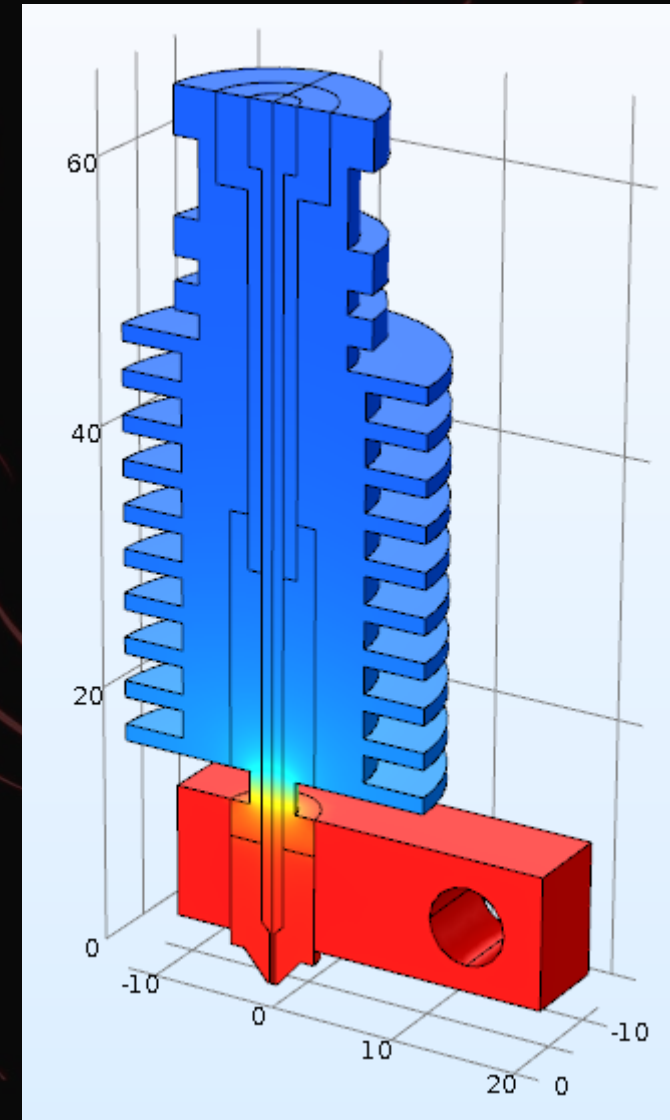


핀 6개

핫엔드 핀 개수에 따른 열해석

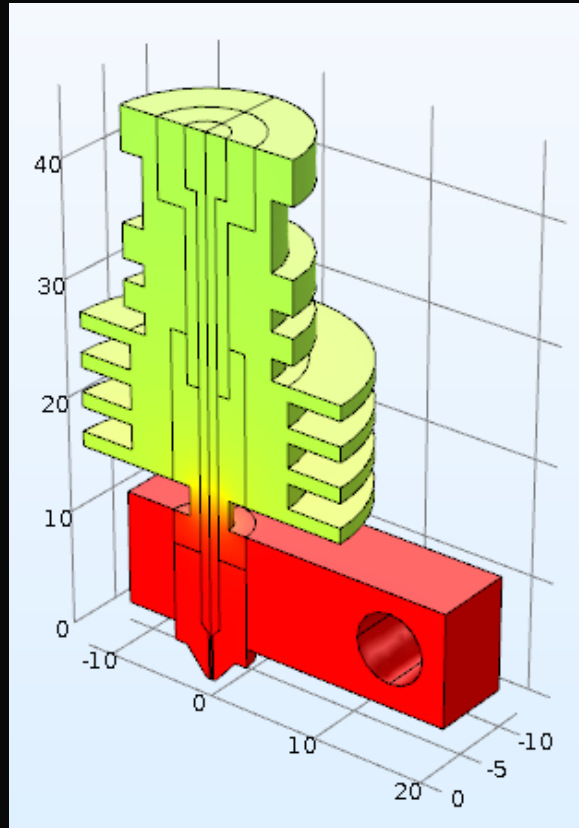


핀 9개

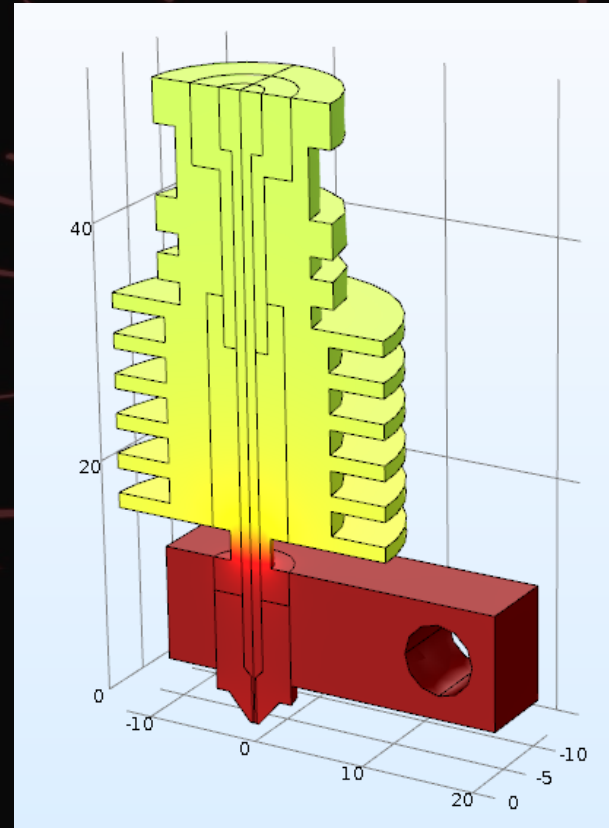


핀 10개

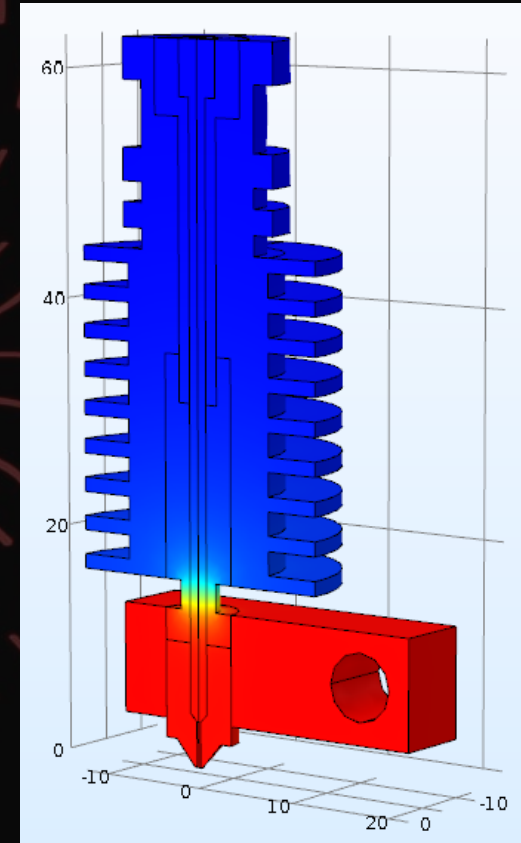
핫엔드 핀 개수에 따른 열해석



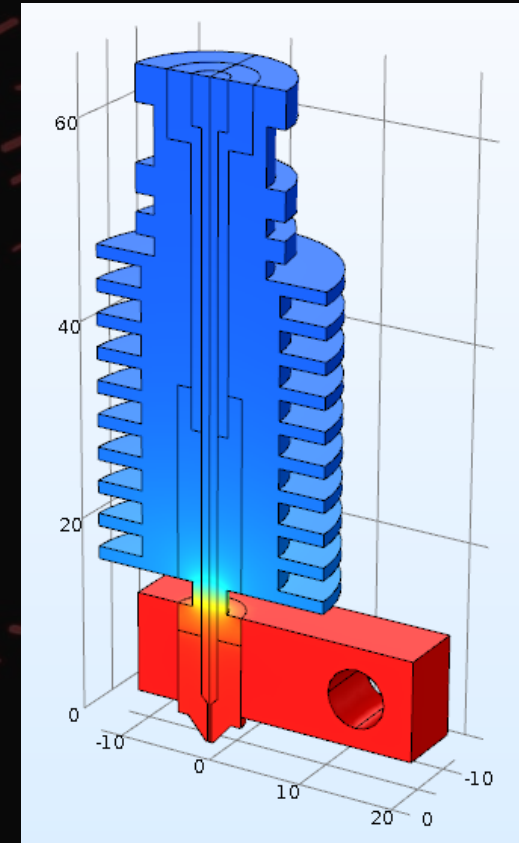
4



6



9

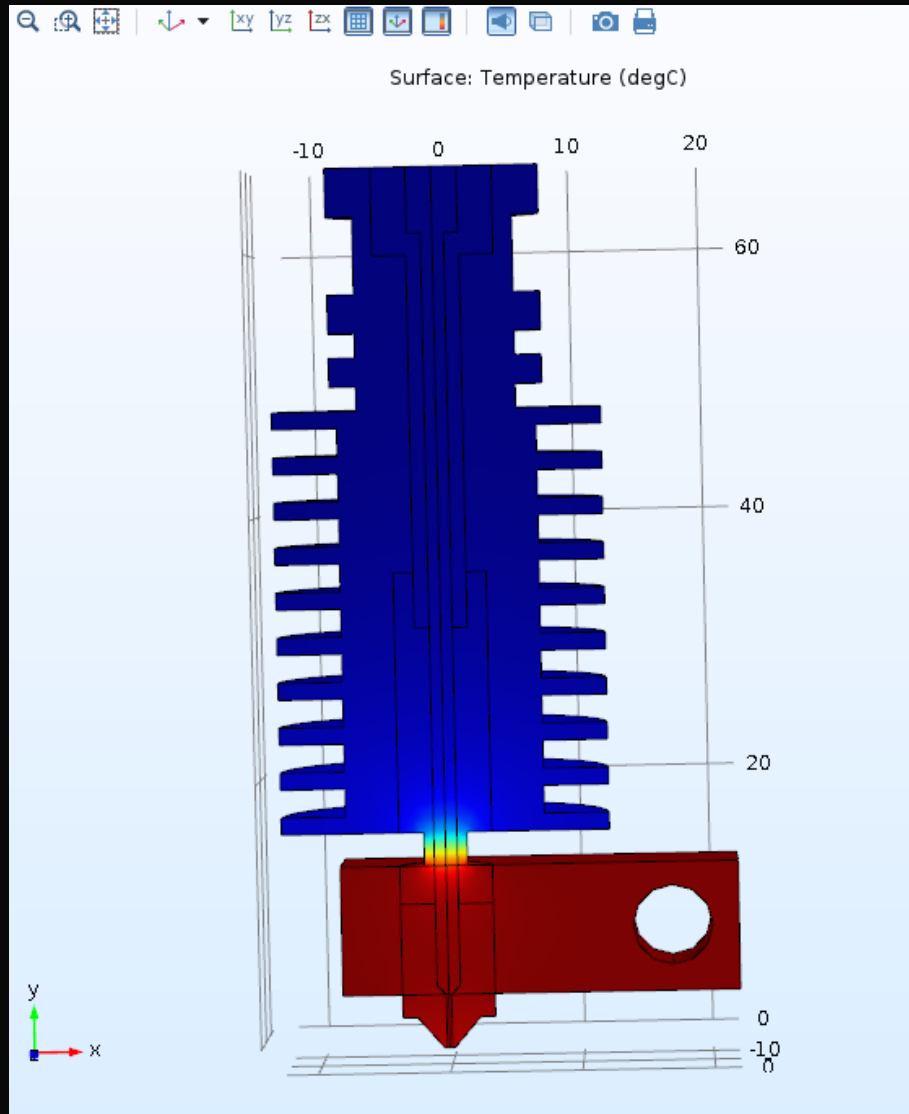


10

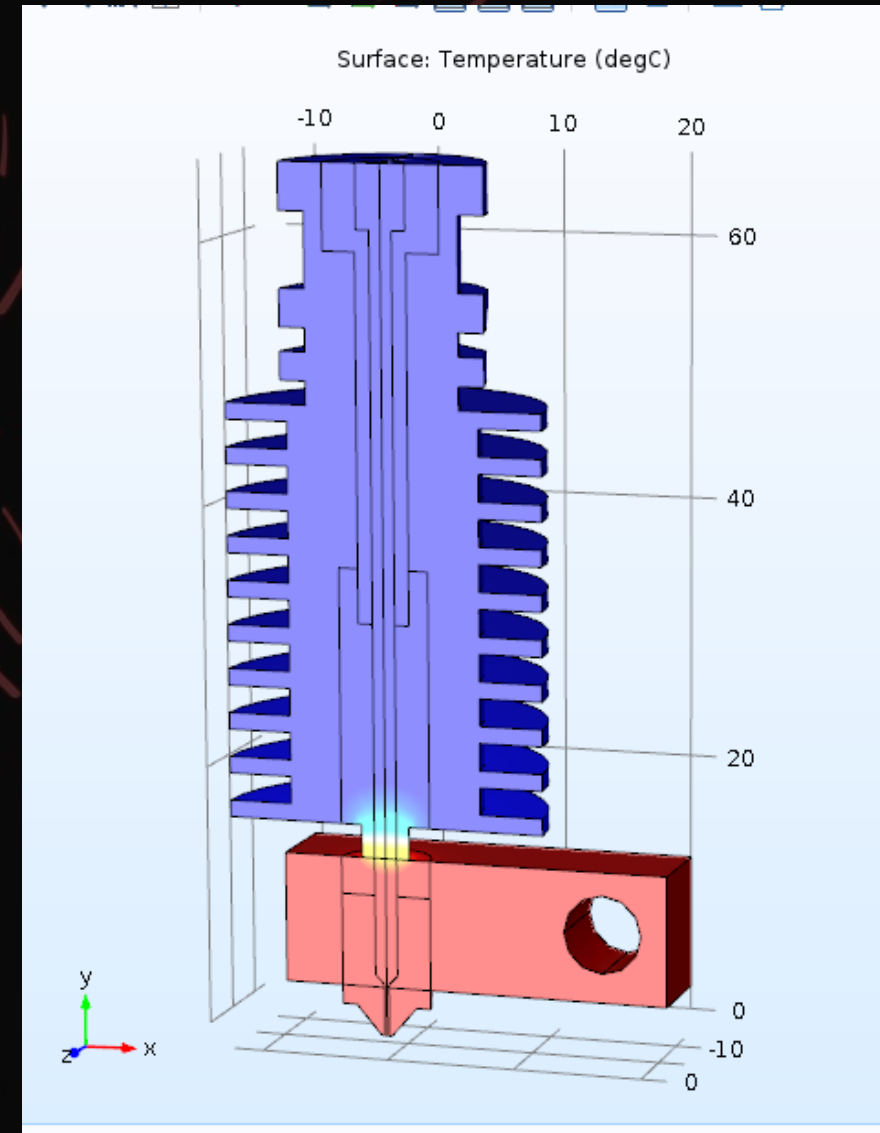
왼쪽에서 → 오른쪽 순으로 핀의 개수 상승
핀의 개수를 6개에서 9개로 늘릴때 고온부와 저온부의 차이가 명확해짐

열 차단부 두께에 따른 열 특성 및 응력 수치해석

핫엔드 열 차단부 두께에 따른 열해석

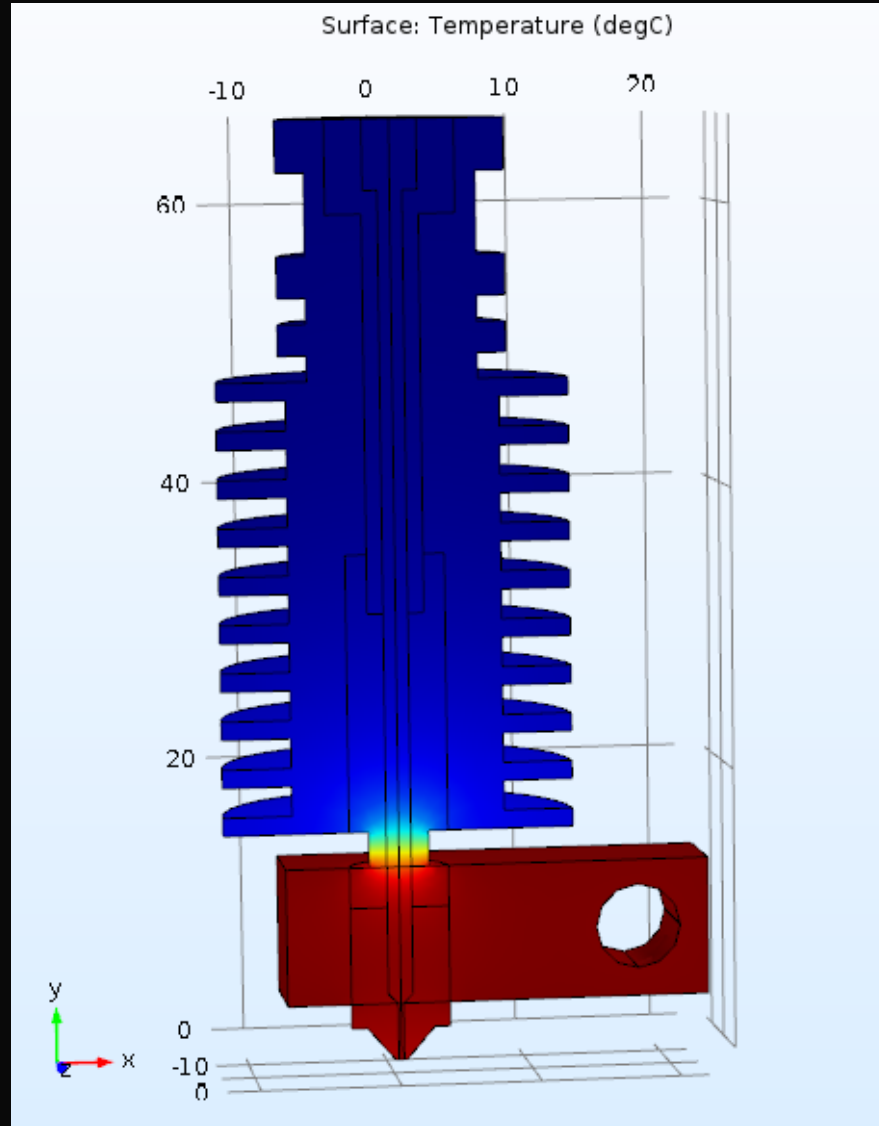


$R = 0.75$

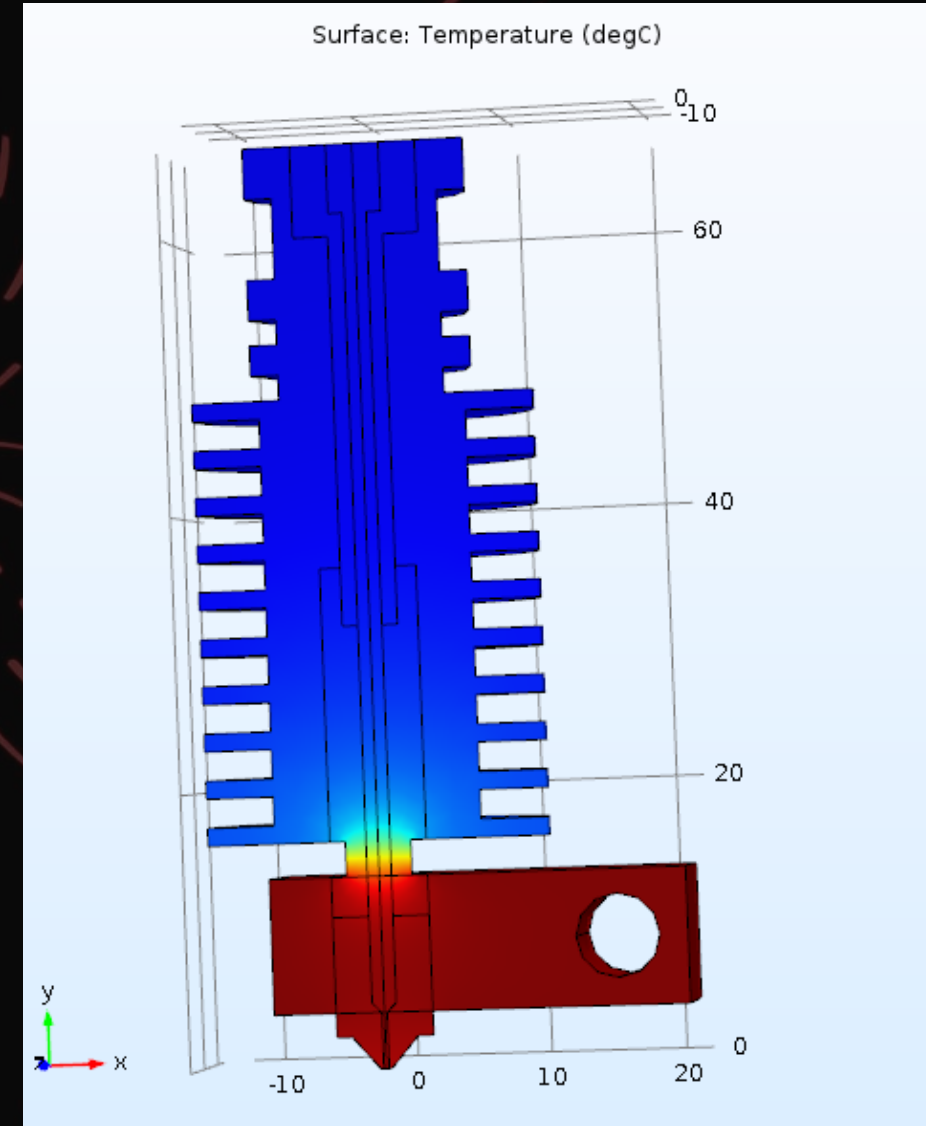


$R = 1$

핫엔드 열 차단부 두께에 따른 열해석

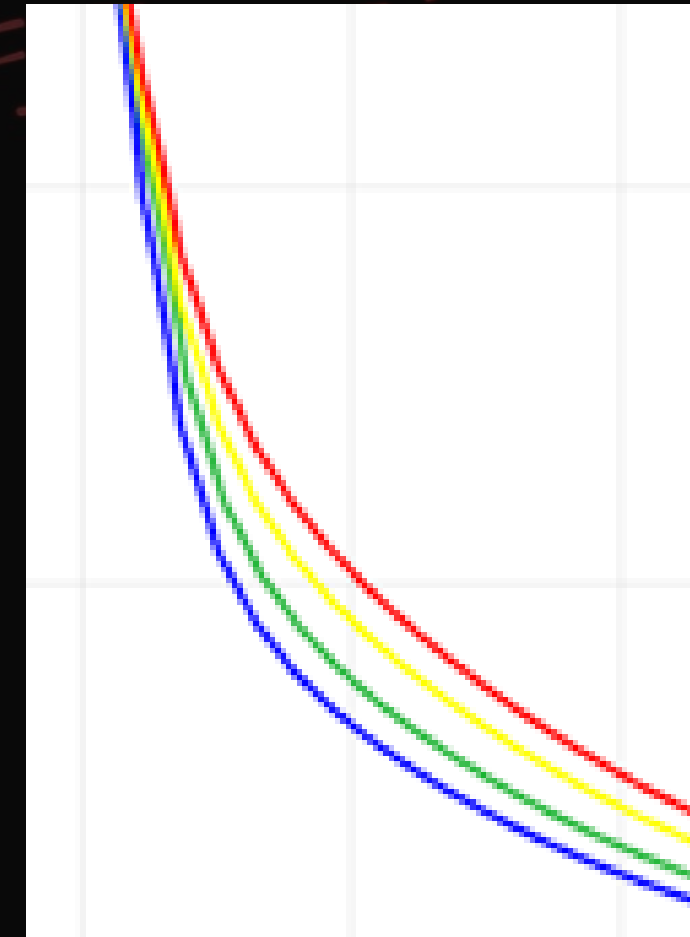
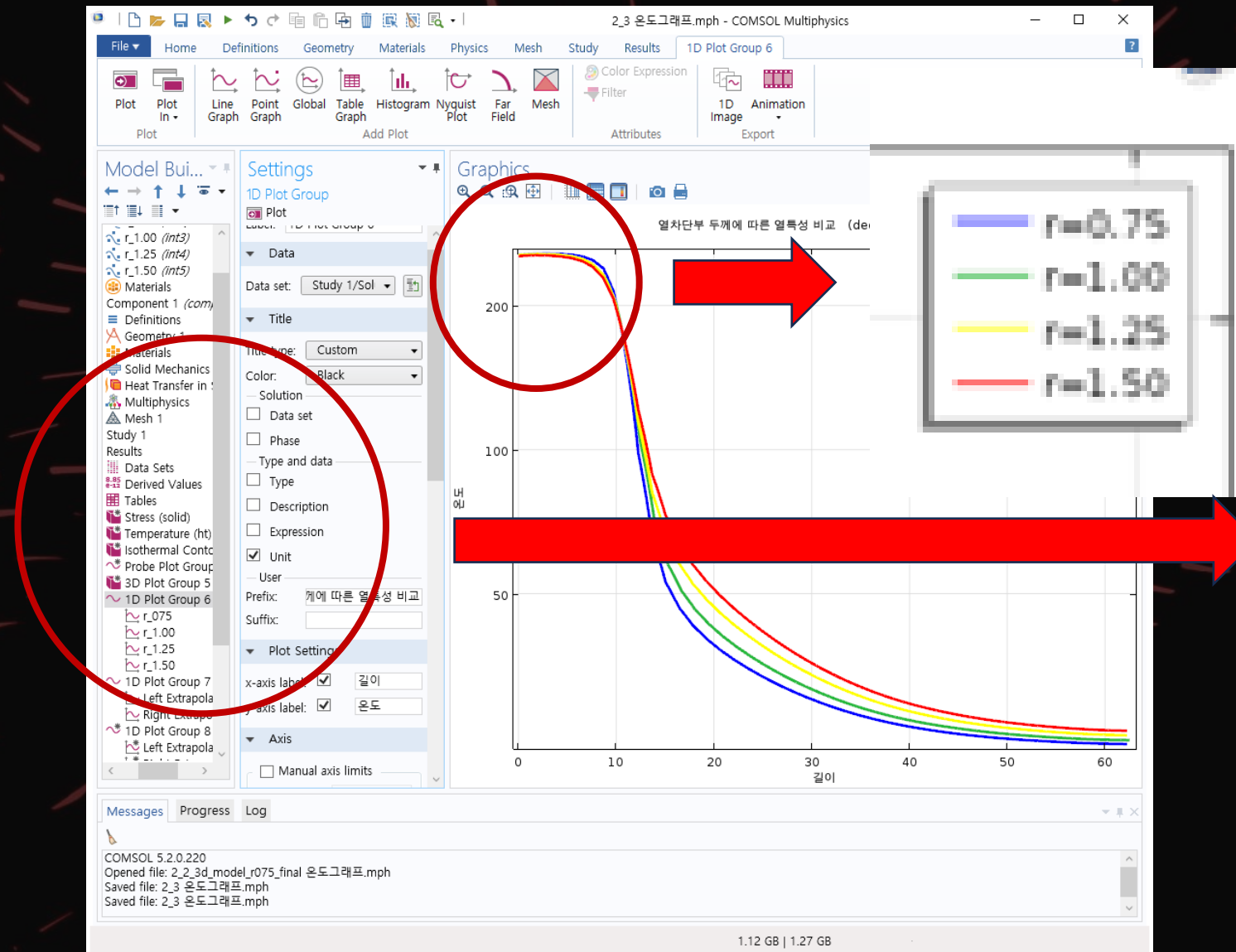


$R = 1.25$

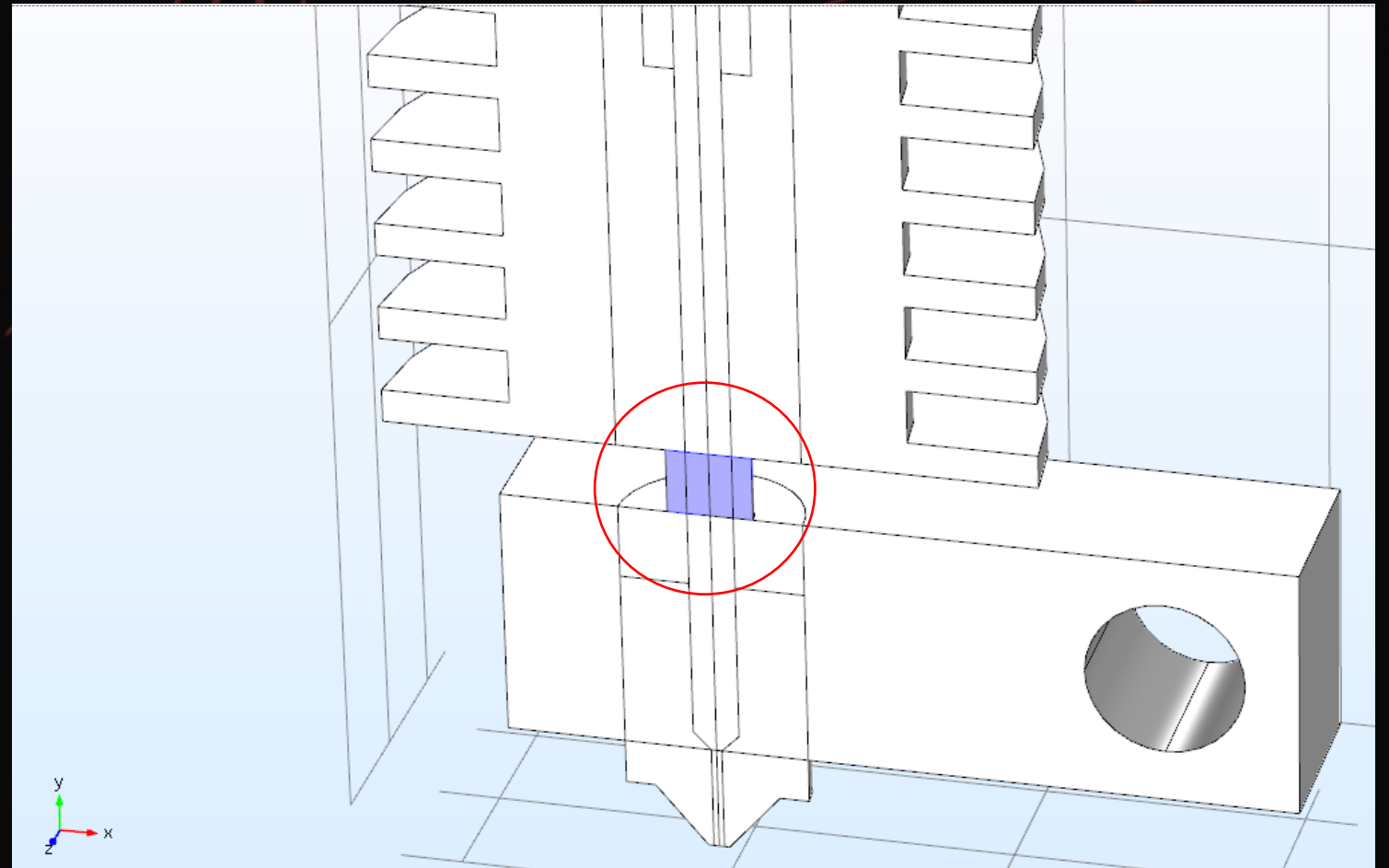
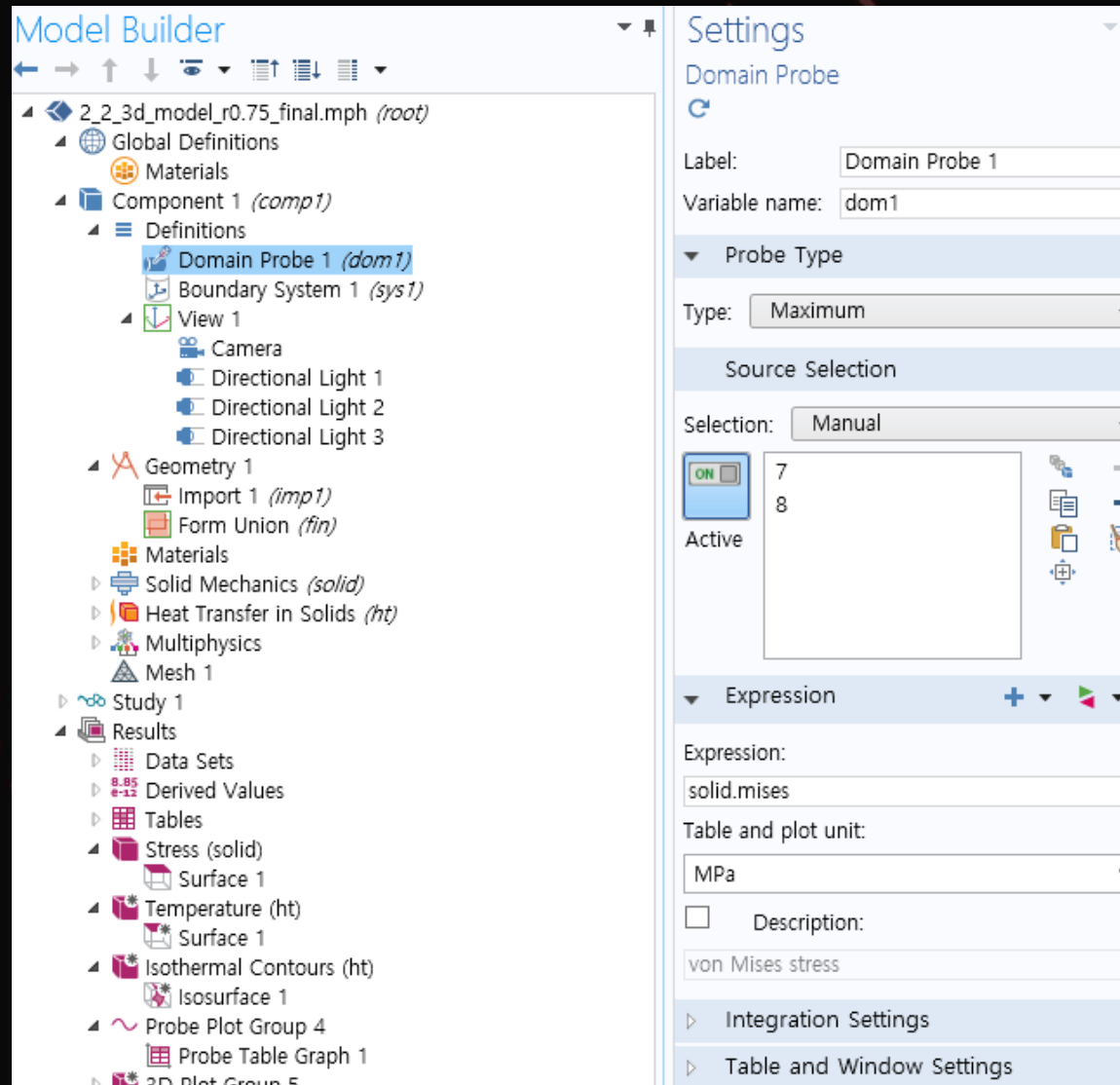


$R = 1.5$

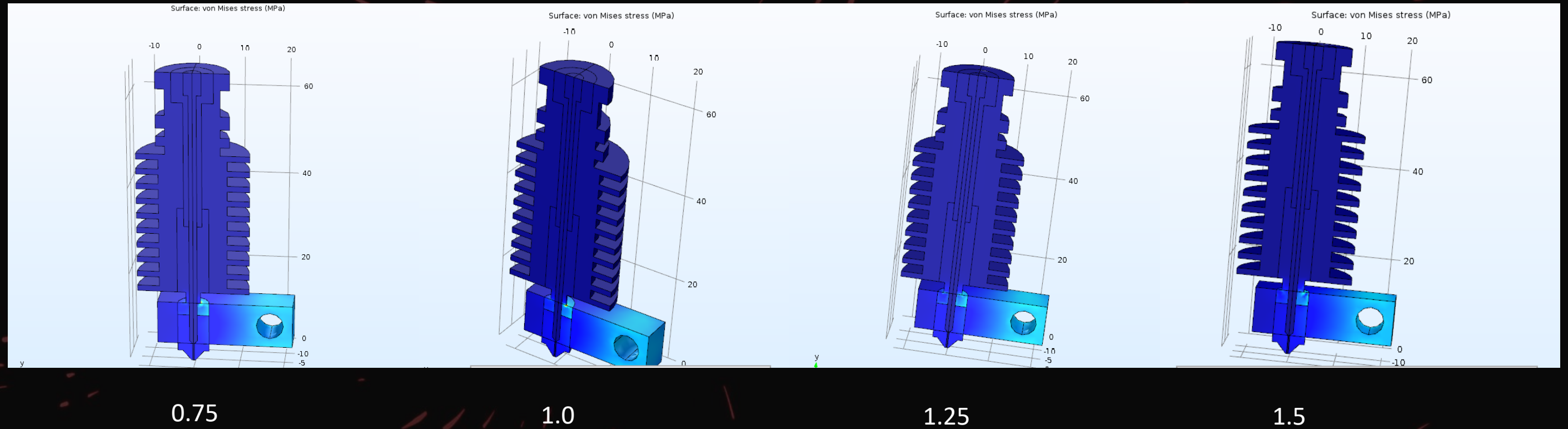
핫엔드 열 차단부 두께에 따른 열해석



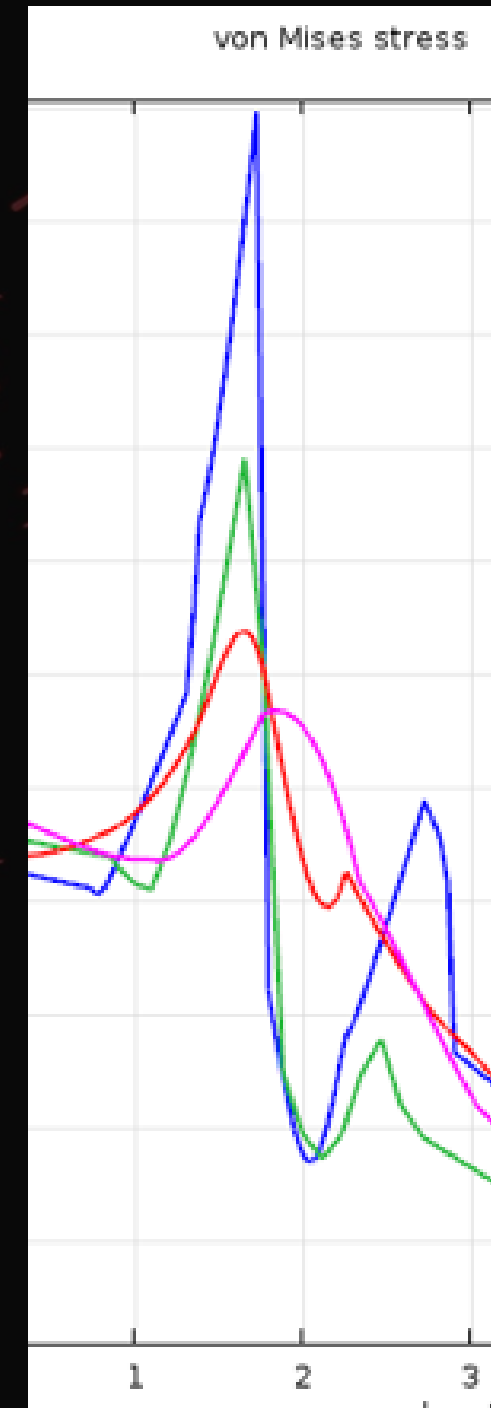
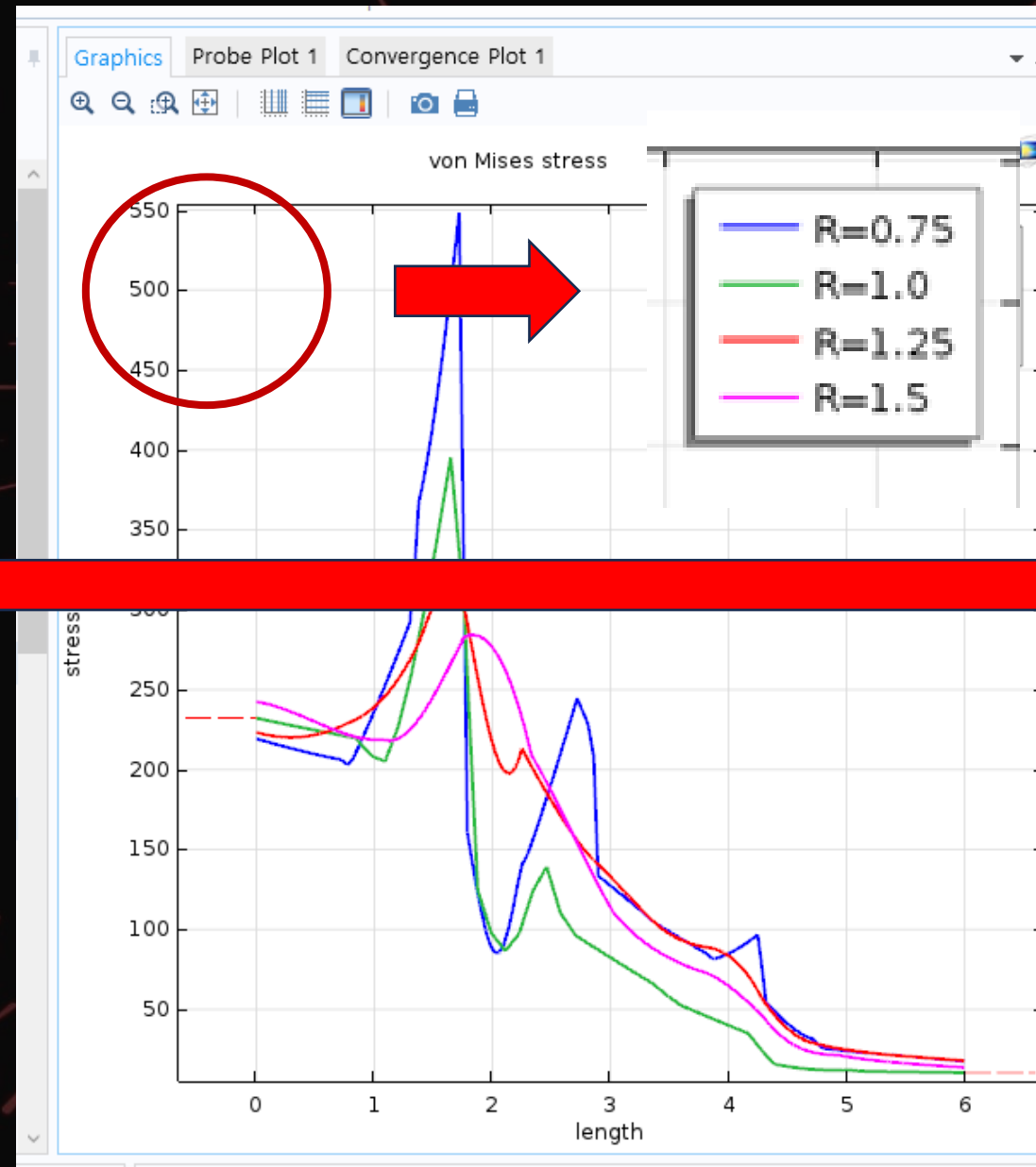
핫엔드 모델링 소개



핫엔드 열 차단부 두께에 따른 응력해석



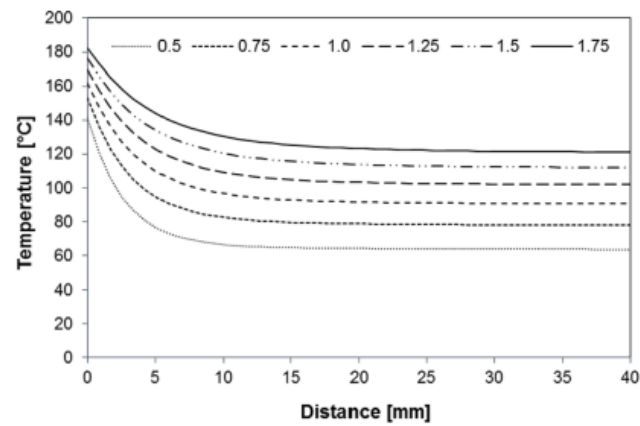
핫엔드 열 차단부 두께에 따른 응력해석



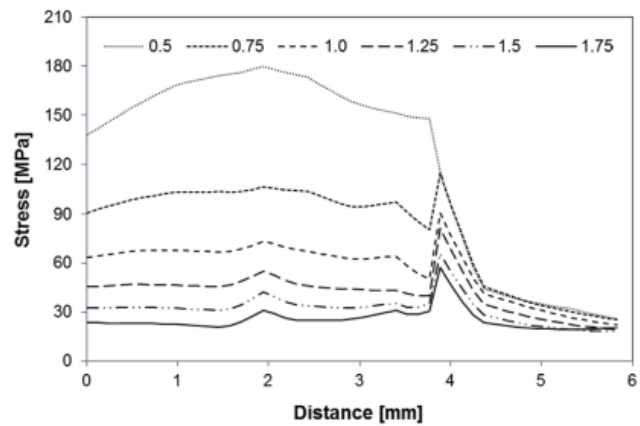
논문의 실험 데이터 비교

Table 3 Comparison of results according to fin numbers

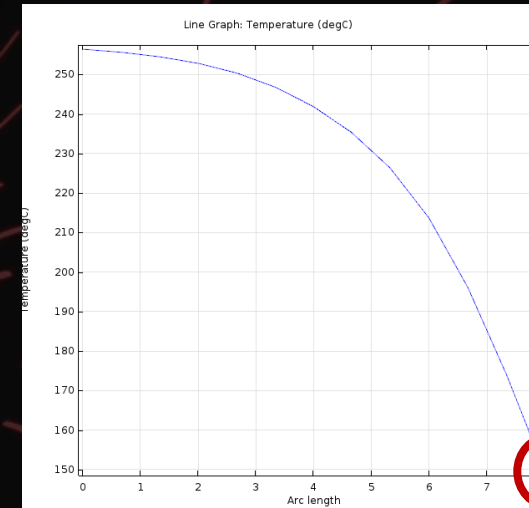
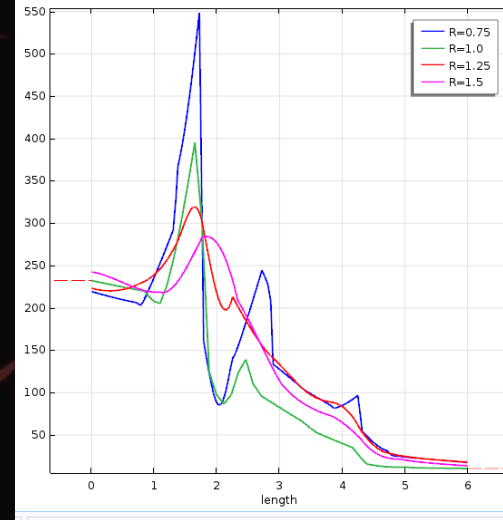
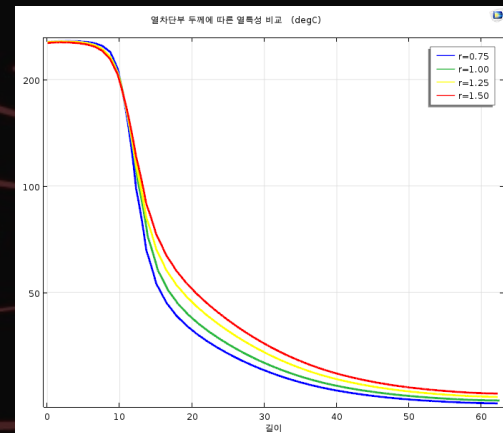
No. of fins	T_c (°C)	$T_{c'}$ (°C)	ΔT_c (°C)	h_A (mm)
11	162.1	90.5	71.6	5.00
10	164.2	94.4	69.8	5.74
8	169.4	103.8	65.6	9.15
6	176.1	115.8	60.3	N/A
5	180.3	123.1	57.2	N/A
4	214.9	196.4	18.5	N/A



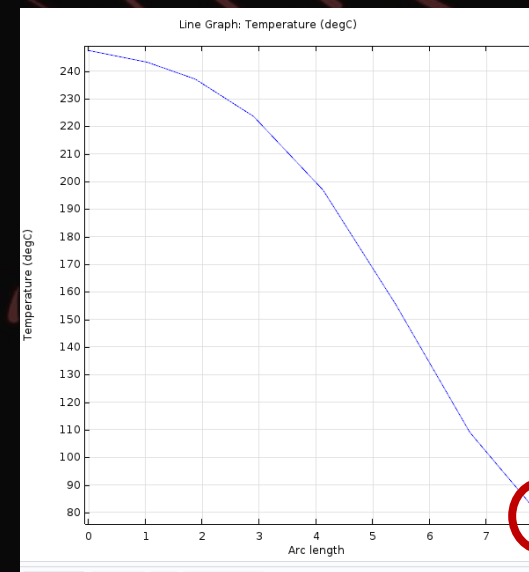
(a) Temperature profile along the path C-C'



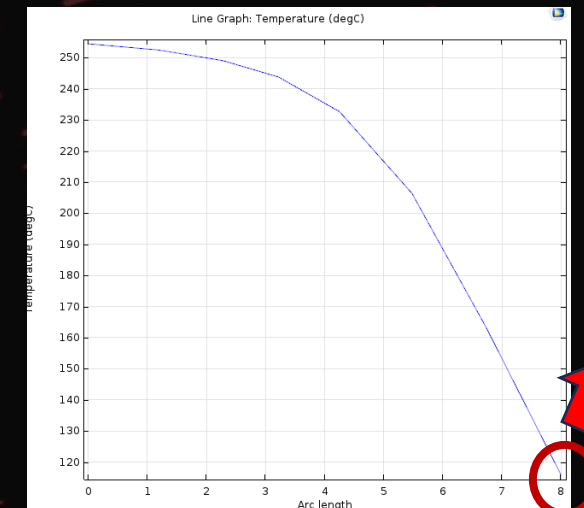
(b) Stress profile along the path D-D'



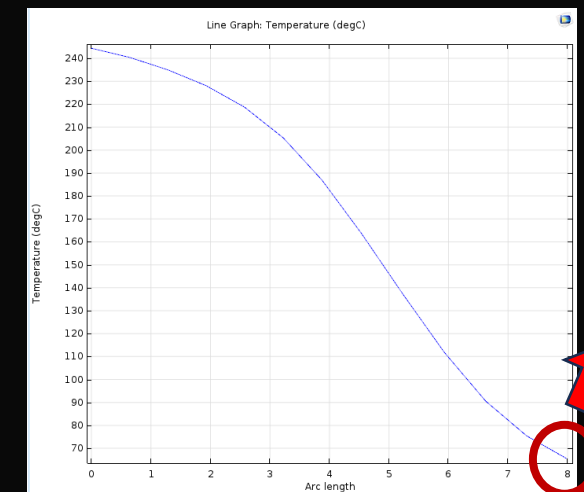
핀 4개
150도
오차율:
23.6%



핀 9개
76도
오차율:
23.3%



핀 6개
115도
오차율:
0.6%



핀 10개
64도
오차율:
32.2%

결론

1

핀이 5 → 6개와 9 → 10개에서는 큰 차이를 보이지 않지만 핀 개수가 6 → 9개에서 큰 차이를 보인다

2

열 차단부 두께가 감소함에 따라 온도 변화율이 증가하고 응력이 높아지는 것으로 보인다

3

응력은 두께가 1.25부터 증가할수록 안정성을 보이지만 $r=1.5$ 일 경우 원활한 열 차단 효과가 발생하지 않는다

4

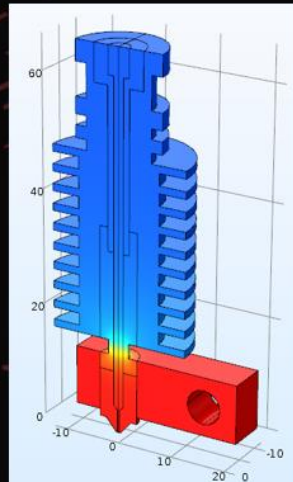
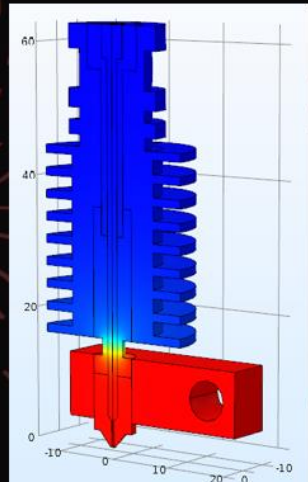
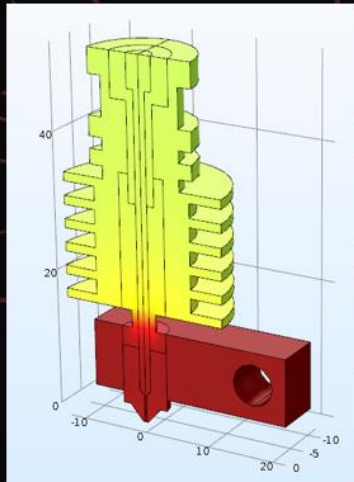
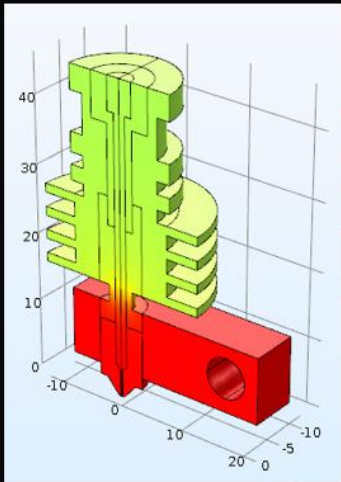
핀개수는 6개에서 9개 사이에 가장 효율적인 온도차단을 보이며, 고온 출력을 위한 금속관 압출부를 설계하고 수치해석을 수행한 결과 1.25mm 범위의 두께에서 온도차단 효과가 높으면서도 구조적 안정성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다.

결론

1

핀이 5 → 6개와 9 → 10개에서는 큰 차이를 보이지 않지만 핀 개수가 6 → 9개에서 큰 차이를 보인다

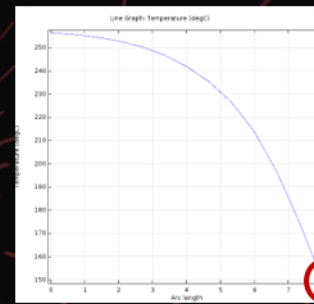
2



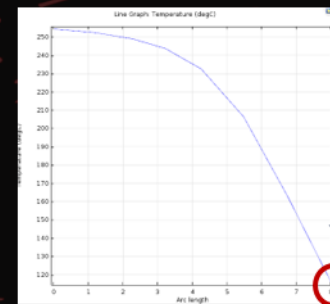
1 응력

=1.5일

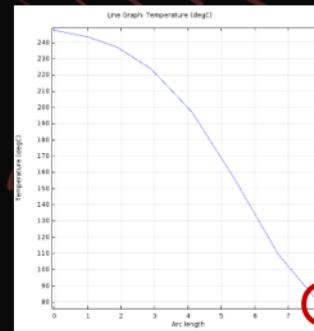
보이다



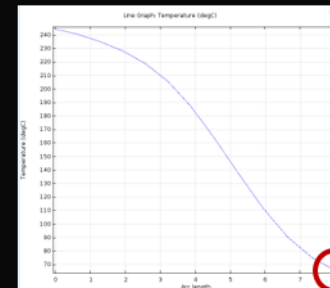
핀 4개
150도
오차율:
23.6%



핀 6개
115도
오차율:
0.6%



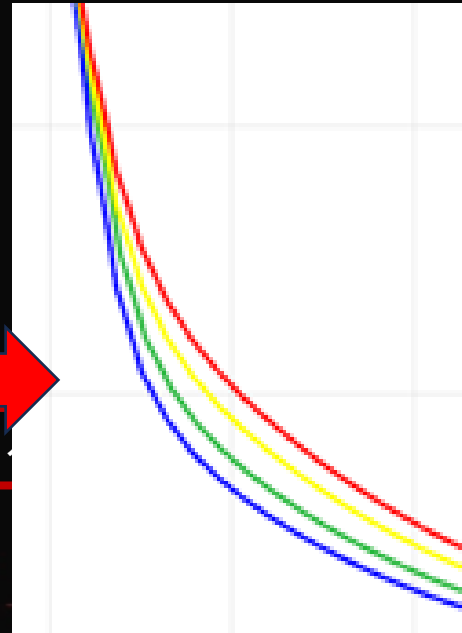
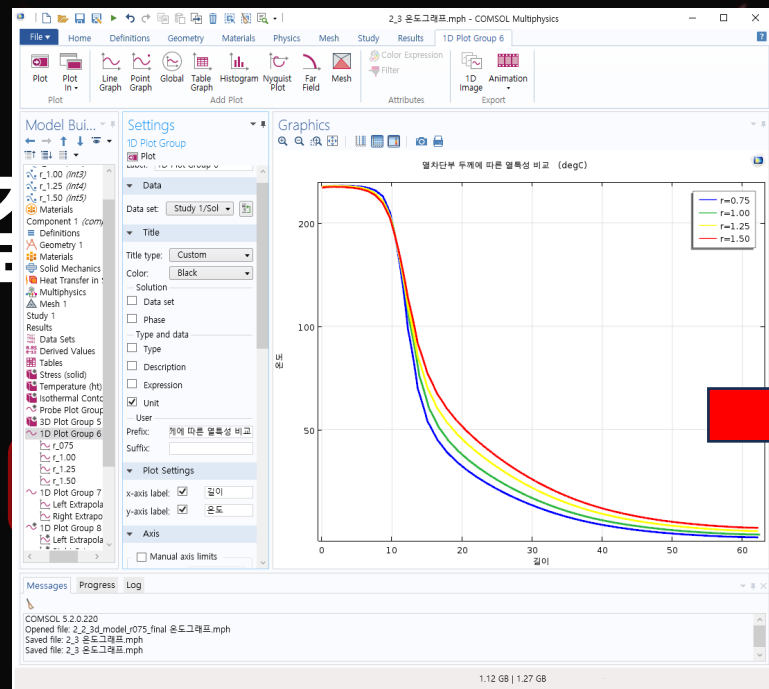
핀 9개
76도
오차율:
23.3%



핀 10개
64도
오차율:
32.2%

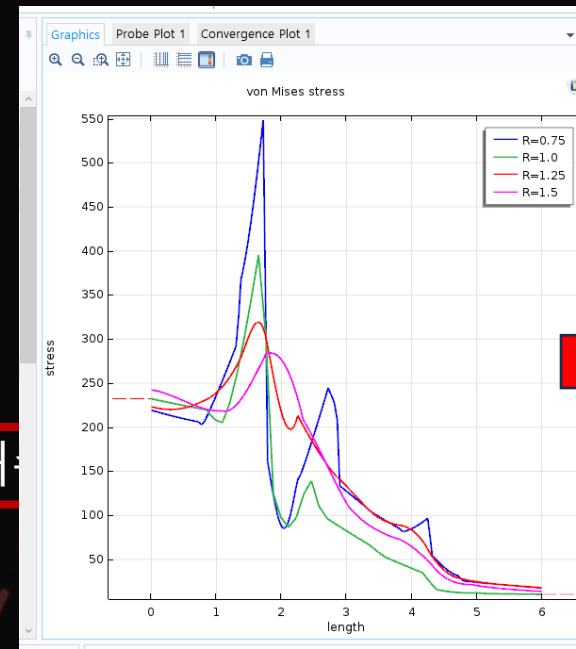
4

압출부를 설계하고 수치해석을 수행한 결과 1.25mm 범위의 두께에서 온도차단 효과가 높으면서도 구조적 안정성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다.

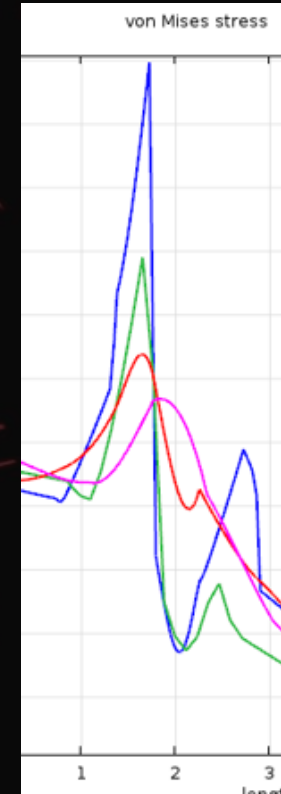


내에

않지만 핀 개



보인다



2

열 차단부 두께가 감소함에 따라 온도 변화율이 증가하고 응력이 높아지는 것으로 보인다

3

응력은 두께가 1.25부터 증가할수록 안정성을 보이지만 $r=1.5$ 일 경우 원활한 열 차단 효과가 발생하지 않는다

4

핀개수는 6개에서 9개 사이에 가장 효율적인 온도차단을 보이며, 고온 출력을 위한 금속관 압출부를 설계하고 수치해석을 수행한 결과 1.25mm 범위의 두께에서 온도차단 효과가 높으면서도 구조적 안정성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다.

결론

1

핀이 5 → 6개와 9 → 10개에서는 큰 차이를 보이지 않지만 핀 개수가 6 → 9개에서 큰 차이를 보인다

2

열 차단부 두께가 감소함에 따라 온도 변화율이 증가하고 응력이 높아지는 것으로 보인다

3

응력은 두께가 1.25부터 증가할수록 안정성을 보이지만 $r=1.5$ 일 경우 원활한 열 차단 효과가 발생하지 않는다

4

핀개수는 6개에서 9개 사이에 가장 효율적인 온도차단을 보이며, 고온 출력을 위한 금속관 압출부를 설계하고 수치해석을 수행한 결과 1.25mm 범위의 두께에서 온도차단 효과가 높으면서도 구조적 안정성을 보장할 수 있음을 알 수 있었다.

고찰

1

방열핀의 개수별 분석과 열 차단부 두께별 분석을 좀더 세밀하게 하고 싶었지만, 제한된 시간으로 인해 각 모델을 개별적으로 구축하고 데이터를 획득하는 작업이 어려웠음

2

HEAT BLOCK을 제외하고는 2차원 회전체로 차원을 낮춰 계산을 줄이고자 하였지만 3D 모델과의 결과값의 차이가 많이 나 사용할 수 없었다.

REFERENCE

Bejan, A., & Kraus, A. D. (Eds.). (2003). Heat transfer handbook (Vol. 1). John Wiley & Sons.

Karasudhi, P. (1991). Foundations of solid mechanics (Vol. 3). Taylor & Francis.

Moran, M. J., & Tsatsaronis, G. (2017). Engineering thermodynamics. In CRC handbook of thermal engineering (pp. 1-112). CRC Press.

Ufodike, C. O., & Nzebuka, G. C. (2022). Investigation of thermal evolution and fluid flow in the hot-end of a material extrusion 3D Printer using melting model. Additive Manufacturing, 49, 102502.

Da-Yeon Shin, Hyun-Joong Lee, Chang-Whan Lee, & Keun Park. (2018). Thermal-Structural Coupled Numerical Analysis for Design of High-Temperature Extruder of FDM 3D Printers. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(3), 341-347.

Zhang, J., Meng, F., & Ferraris, E. (2023). Temperature gradient at the nozzle outlet in material extrusion additive manufacturing with thermoplastic filament. Additive Manufacturing, 103660.



Q&A