# 3D Printer Extruder Optimal Design ReInpossible Team

Seoul National University of Science & Technology Mechanical Engineering

Advisor

Prof. MinsooPark

Team

WoonHong Min SeongJun Hong





# 

Introduction 3
• Research Background 4
Problem Definition 7
Solution Suggestion 10
Design Goals 12
Process Overview 13
Modeling14
Reference Model 15
Initial Model 16
Analysis & Optimization 19  Simulation Model 20
Analysis & Optimization 19 Simulation Model 20 Boundary Condition 21
Analysis & Optimization 19 Simulation Model 20 Boundary Condition 21 Analysis 22
Analysis & Optimization    19      • Simulation Model    20      • Boundary Condition    21      • Analysis    22      • 1st Optimization    22
Analysis & Optimization 19 • Simulation Model 20 • Boundary Condition 21 • Analysis 22 • 1 <sup>st</sup> Optimization 22 All-driven Design 32
Analysis & Optimization 19 • Simulation Model 20 • Boundary Condition 22 • Analysis 22 • 1 <sup>st</sup> Optimization 25 Al-driven Design 37 • Al-driven Design 32
Analysis & Optimization    19      • Simulation Model    20      • Boundary Condition    21      • Analysis    22      • 1st Optimization    22      • Al-driven Design    32      • Al-driven Design Verification    32





# Introduction

- Research Background
- Problem Definition
- Solution Suggestion
- Design Goals
- Process Overview





### Research Background

- ✤ 3D Printing Market Trends
  - 글로벌 3D 프린팅 시장규모 전망(2017-2025)



#### 글로벌 주요국들은 3D프린팅 기술을 차세대 제조산업의 핵심기술로 간주하여 이에 기반한 제조산업 경쟁력 강화를 위하여 다양한 투자 진행 중

주요 국가별 3D프린팅 관련 정책 동향

### Research Background

✤ What is ME 3D Printer?



ME (재료압출방식)

FFF, FDM 등으로 불림

방식

-

-



간단한 구조와 프로그램으로 인하여,

- 가는 실 같은 필라멘트 형태의 재료를 노즐 안에서

다양한 산업 분야 적용 및 개인 사용이 용이함

3D 프린팅 기술의 대중화

녹여 압출하여 한 층씩 적층해나가며 프린팅하는



### Research Background

- ✤ Main component of ME 3D printer
  - 재료압출방식 3D 프린터의 요소 개선 중요성 평가
  - 중요 부품: 압출기, 이동 메커니즘, 데스크탑, 가이드, 제어 시스템, 전원 공급 장치

\*출처: R Zagidullin, T Mitroshkina, "Quality function deployment and design risk analysis for the selection and improvement of FDM 3D Printer"







### **Problem Definition**

✤ Extruder







### **Problem Definition**

Problem

🔁 서울과학기술대학교



\*출처: Kim, K. E., Park, K., and Lee, C., "A Study on Development of Three-Dimensional Chocolate printer," J. Korean Soc. Precis. Eng.



### **Problem Definition**

Solution Direction



\*출처 Erzurum Technical University Faculty of Engineering, "COMMON FDM 3D PRINTING DEFECTS"





## Solution Suggestion

- ✤ Solution Direction : Barrel
  - 배럴 열차단부의 두께







## Solution Suggestion

- ✤ Heat Sink
  - 히트싱크의 형상





### Design Goals



- 필라멘트 연화 방지를 위한 냉각 설계 필요
- 배럴 열차단부의 응력 집중을 고려한 구조적 안전 설계 필
  요
- 열구조 해석을 통한 배럴 열차단부의 두께 최적화
- 열 해석을 통한 히트싱크 높이 선정
- 열 해석 및 AI 설계를 통한 히트싱크 형상 제시





### Process Overview







# Modeling

- Reference Model
- Initial Design

🔥 서울과학기술대학교



## **Reference Model**

Reference Model



Sa	apphire Pro	
	프린터 크기	405 x 360 x 480 mm
	최대 인쇄 영역	235*235*235 mm
	무게	11.5kg
	작동 방식	카르테시안(직각좌표계) -코어 형
	익스트루더 최대 온도	260 °C
	제조사	Two Trees
	프레임	알루미늄
	필라멘트	PLA, ABS
	노즐 직경	0.4mm





## Initial Design

Extruder

### Current Design











**ALTAIR** 

## **Initial Design**

- \* Parts
- Heat Sink ٠



AA6061						
밀도	2.69 X 10 <sup>-6</sup>	열팽창계수	2.3 X 10 <sup>-5</sup>			
탄성계수	69000	초기온도	293.15			
포아송비	0.33	열전도계수	0.17			

※ 단위 : 길이 [mm], 밀도 [kg/mm³], 탄성계수 [Mpa], 열팽창계수 [1/K], 초기온도 [K], 열전도계수 [W/mm·K] 사용 프로그램: AUTOCAD, INVENTOR

Barrel ٠





SS303						
밀도	8.73 X 10 <sup>-6</sup>	열팽창계수	2.05 X 10 <sup>-5</sup>			
탄성계수	96500	초기온도	293.15			
포아송비	0.31	열전도계수	0.116			

\*출처: 1. Thermal-Structural Coupled Numerical Analysis for Design of High-Temperature Extruder of FDM 3D Printers, Da-Yeon Shin, Hyun-Joong Lee, Chang-Whan Lee, and Keun Park

2. Grabcad cloud





## Initial Design

Parts



• Heat Block



※ 단위 : 길이 [mm], 밀도 [kg/mm³], 탄성계수 [Mpa], 열팽창계수 [1/K], 초기온도 [K], 열전도계수 [W/mm·K] 사용 프로그램: AUTOCAD, INVENTOR



Nozzle

٠

20

Ø4.8

6



	Teflon								
	밀도	2.2 X 10 <sup>-6</sup>	열팽창계 수	11.2 X 10 <sup>-5</sup>					
	탄성계 수	1800	초기온도	293.15					
	포아송 비	0.46	열전도계 수	0.00035					
서울	과악기술니	비옥교							

AA6061						
밀도	2.69 X 10 <sup>-6</sup>	열팽창계 수	2.3 X 10 <sup>-5</sup>			
탄성계 수	69000	초기온도	293.15			
포아송 비	0.33	열전도계 수	0.17			

Brass							
밀도	8.73 X 10 <sup>-6</sup>	열팽창계 수	2.05 X 10 <sup>-5</sup>				
탄성계 수	96500	초기온도	293.15				
포아송 비	0.31	열전도계 수	0.116				

# Analysis & Optimization

- Simulation Model
- Boundary Condition
- Analysis
- 1<sup>st</sup> Optimization





### Simulation Model

◆ 사용 프로그램



- AI 연동 시뮬레이션의 주기 효율성 1. 자동화 템플릿 : 반복적인 후처리 작업 관리 용이
  - 2. CPU 가속 : 해석 가속화를 위한 병렬처리 요소 품질 저하로 인한 해석 중단 방지를 위해 Solution Parameter 조정

메쉬 \*

- 해석 시간과 가열부의 y축에 대한 비대칭성을 고려하여 TET4 Mesh 활용
- Mesh 개수: 460만개
- Mesh 크기: 0.2mm (average element size)





### **Boundary Condition**

- 해석 시간 단축을 위해 xy평면 symmetry 조건을 사용하여 3D, 1/2 모델 해 석







## Analysis

익스트루더 최적 설계 개요							
순서	배럴	익스트루더					
대상	배럴 열차단부의 두께	1차 설계:히트싱크의 높이	2차설계: 히트싱크의 형상				
방향성	단열 - 강성 고려	공간 활용성 - 방열 고려	방열 최대화				
목표	단위 두께당 최대 응력 감소량 배럴 최상,하단부의 온도 편차 > 110K	단위 높이당 최대 온도 편차	배럴 최상단 튜브의 내측 온도 < 368K (ABS의 유리전이 평균 온도 : 368K)	익스트루더 최적안 제시			
해석	열 – 구조 연계 해석	열해석	열해석				
최적화 방향	해석 결과 기반 재선정	해석 결과 기반 재선정	AI 설계				





## Analysis

- Heat Transfer Analysis
- 정상상태 도달 시점 온도분포







## Analysis

- Structure Analysis
- 정상상태 도달 시점 von-Mises 응력 분포 (열응력 변환 후 외력 부여)





- ✤ Thermal Structure Coupled Analysis (t = 1.25, 1.4, 1.55, 1.7mm)
- 정상상태 도달 시점 온도 분포





- ✤ Thermal Structure Coupled Analysis (t = 1.25, 1.4, 1.55, 1.7mm)
  - 정상상태 도달 시점 von-Mises 응력 분포 (열응력 변환 후 외력 부여)



\* A-A' 온도 분포 측정 (가열부와 방열부 사이 배럴 내측 온도)



1.4

104.853

1.55

98.59

1.7

91.958

1.25

119.139

열차단부 두께(mm)

응력 변화 (MPa)

#### • 배럴 열차단부 외측 응력 그래프 (열차단부 두께 별)





✤ Thermal - Structure Coupled Analysis (t = 1.25, 1.4, 1.55, 1.7mm)

• 배럴 열차단부 외측 응력 그래프 (열차단부 두께 별)



Stress profile along the path B-B'

 배럴 열차단부 외측 응력 비교 (열차단부 두께 별)

0mm 지점				
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7
응력 [MPa]	257.584	201.681	148.409	140.721
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	<b>5</b> 5.	903 5	3.272 7	.688
0.21mm 지점				
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7
응력 [MPa]	313.626	248.889	177.841	109.564
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	67.	<b>7</b> 37 6	8.048 68	3.277
1.89mm 지점				
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7
응력 [MPa]	432.725	366.752	300.92	259.889
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	65.	.973 6	5.832 4	1.031
2.1mm 지점				
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7
응력 [MPa]	376.723	306.534	246.989	232.706
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	70.	.189 5	9.545 14	4.283





- **Optimal Barrel Thickness** \*
  - 배럴 열차단부 외측 응력 비교 (열차단부 두께 0m趨)지점

두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7		설계	다	의 드께다	치대 으려	가소랴	
응력 [MPa]	257.584	201.681	148.409	140.721		목표		TI T″IIO	ᅬᆌᆼᆨ		
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	55.	<b>903</b> 53.	272 7.	.688				(/	시섬 멀)		
).21mm 지점					-						
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7	•	배럭 내측	- 최상 하다.	보 오도 펴차	(역차다부 두	께벽	
응력 [MPa]	313.626	248.889	177.841	109.564			-10,°10				
단위 두께당						열차단부	두께(mm)	1.25	1.4	1.55	1.7
응력 감소량 [MPa/mm]	67.	737 <b>68.0</b>	<b>)48</b> 68	3.277		온도 핀	<u>년</u> 차 (K)	116.954	114.684	109.499	111.24
1.89mm 지점											
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7							
응력 [MPa]	432.725	366.752	300.92	259.889		설계	배럭추	지상 하단	본이 오도 I	펴차 > 110	K
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	65.9	<b>73</b> 65.8	<b>3</b> 2 <b>4</b> 1.	<b>0</b> 31		복표		-10, -10			ĸ
2.1mm 지점					-						
두께 [mm]	1.25	1.4	1.55	1.7							
응력 [MPa]	376.723	306.534	246.989	232.706	.: 두가기	지 설계조	건을 모두	만족하는	1.4mm	를 배럴의	최적 두기
단위 두께당 응력 감소량 [MPa/mm]	70.	<b>189</b> 59.	<b>5</b> 45 14.	 283		. —	•	–		·· _ ·	



배럴 내측 최상,하단부 온도 편차 (열차단부 두께 별)

열차단부 두께(mm)	1.25	1.4	1.55	1.7
온도 편차 (K)	116.954	114.684	109.499	111.246







배럴 열차단부의 두께 1.4mm 적 용

∴ 단위 높이당 온도 편차가 가장 큰 44mm를 히트싱크의 높이로 선정





- Optimization Result Extruder
  - Heat Transfer Analysis



X Y Plot



- Al-driven Design
- Al-driven Design Verification
- 2<sup>nd</sup> Optimization





What is Al-driven Design? \*

### AI 스스로 진화하는 능력을 터득하다 AI, 자신의 뇌를 직접 설계하다 I 구글 연<sup>:</sup> '이제 설계도 인공지능 시대'...자동화 AI 설계 시스템이란? 전4' 설계 성공 이 소형 서이기자 ! 이 스이 2024 04 00 24:45 ! 이 태그 0

## 구글, 반도체 설계에 AI 적용..."수개월 걸리던 작업을 6시간 만에"

옷 김동원 기자 ④ 입력 2021.06.10 14:26 ⊙ 수정 2021.06.30 12:01 퇴 댓글 0 ♡ 좋아요 0



수개윜에 걸쳐 반도체 칩에 메모리 소자를 평면 배치한 설계(왼쪽)와 인공지능이 몇 시간 만에 같은 반도체 칩에 소자를 배치한 모습. 인공지능의 설계가 훨씬 효율이 높았다. /네이처





What is Al-driven Design?





• AI를 적용한 자동 설계 지원 시스템



- <mark>딥러닝 기반</mark>의 고차원 비선형 물리학 근사를 이용하여 <mark>복합재, 비선형 과도 최적화</mark> 가능
- 복잡한 형태의 목적함수를 개발, 적용할 필요가 없음
- Base CAD모델이 필요 없음
- 이미 학습된 가중치를 바탕으로 최적설계 속도 증대
- 해석 기반의 최적 솔루션이기 때문에 신뢰성이 있음





Reinforcement Learning







#### RL environments

"최적설계 규칙에 맞게 목표를 달성 할 수 있는 AI를 만들기 위해 올바르게 문제를 정의해주는 것"





✤ AI-driven Design Mechanism







- Example Structure
  - AI 설계를 <mark>검증</mark>하기 위하여 <mark>데모 테스트</mark>를 진행함
    - 설계 대상 및 목표







Example Structure









Example Structure









익스트루더 최적 설계 개요							
순서	배럴	히트	익스트루더				
대상	배럴 열차단부의 두께	1차 설계:히트싱크의 높이	2차설계: 히트싱크의 형상				
방향성	단열 - 강성 고려	공간 활용성 - 방열 고려	방열 최대화				
목표	단위 두께당 최대 응력 감소량 배럴 최상,하단부의 온도 편차 > 110K	단위 높이당 최대 온도 편차	배럴 최상단 튜브의 내측 온도 < 368K (ABS의 유리전이 평균 온도 : 368K)	익스트루더 최적안 제시			
해석	열 – 구조 연계 해석	열해석	열해석				
최적화 방향	해석 결과 기반 재선정	해석 결과 기반 재선정	AI 설계				





- ✤ Boundary Condition
  - 앞서 1차 최적화에서 도출된 t = 1.4mm, H = 44mm 모델의 경계조건을 적용
  - 축 대칭 요소만을 남기고 전도 열전달이 발생되는 하단부에 사전에 산출한 온도 조건 부여







- ✤ Optimization Condition
  - 1. 해석 종류 : Steady State Heat Transfer
  - 2. Design Area
    - 가로 : 12mm 세로 : 32mm 영역
    - 해석시간 단축을 위해 <mark>축 대칭 단면</mark>으로 설정 (L = 0.2mm)
    - Unit Cell : 모델을 이루는 기본단위
      - ➢ W : 2mm H : 4mm L : 0.2mm
      - ▶ 디자인 공간 내부에 최대 48개 생성 가능
  - 3. Response
    - 필라멘트유입부에 밀접한 Barrel상단 Tube의 평균 온도
  - 4. Constraint
    - 별도의 제약조건 없음
  - 5. Objective
    - Tube의 평균 온도 <mark>최소화</mark>





✤ Heat Sink Optimization



- Unit Cell 생성
  - 1. AI에 의해 생성 확률 결정
    - 학습된 데이터들을 기반으로 각 UnitCell 의 생성 확률을 결정
    - 생성된 확률을 기반으로 SimLab 자동화 스크립트에서 UnitCell 을 생성

2. 생성 <mark>후처리</mark>

- DataBase Import : 기존에 만들어 놓은 SimLab Database파일을 불러온다.
- Boolean : UnitCell사이의 내부 면을 제거하고 하나의 2D Mesh Body로 병합
- 3D Mesh : 해석을 위해서 Tet mesh로 변환 (average size = 0.2mm)
- Assign Material : Heat Sink의 재료인 AA6061로 지정





✤ Heat Sink Optimization



#### ▪ 모델 해석

- 1. 열 해석 진행
  - 생성된 Mesh모델을 Input으로

Optistruct Steady State Heat Transfer Solver를 Import

2. 경계조건 부여

- 사전에 해석된 결과들을 바탕으로 단순화한 온도조건 입력
  - Temperature : Heat Block 접촉 부 495.42K
- 확률에 의해 생성되는 모델이므로 Convection이 생기는 face Group 정의 필요
  - Face Group : Python 코드를 이용해 대칭면과 접촉면 제외한 Outer Surface 선택
  - Convection : 외부온도 295K 의 자연대류, Film Coefficient : 5E-06 W/(mm2\*K)
- 3. CAE Data Output

과학기술대학교

- Response 추출 : 필라멘트유입부에 밀접한 Barrel상단 Tube의 평균 온도





✤ Heat Sink Optimization



#### • 해석 결과 학습

#### 1. 추출된 Response를 바탕으로 Reward 함수 설정

- provided an adequate reward function, our agent generated optimal shapes without any priori knowledge of aerodynamic concepts
- Constraints can be weakly enforced (in a non-mathematical sense) by adding penalties to the reward function that eventually prohibits undesired behaviors from the network.

Direct shape optimization through deep reinforcement learning J. Viquerat, J. Rabault, A. Kuhnle et al, Journal of Computational Physics, 2020.110080

- 2. Reinforcement Learning의 네트워크 학습
  - Reward 함수에서 구해진 Reward값으로 Deep Neural Network를 학습시키며, 최종 Reward가 최대화되는 방향으로 Neural Network의 가중치 수정

#### 3. <mark>생성 확률</mark> 결정

- Deep Neural Network의 Output으로 UnitCell 생성 확률의 <mark>평균</mark>과 표준편차를 근사

pisode: 3264 Time: 37.1015164852142 avg_temp: 462.502594
SimLab 백그라운드 동작 중
pisode: 3265 Time: 38.0424702167511 avg_temp: 437.394867
SimLab 백그라운드 동작 중
pisode: 3266 Time: 37.5801062583923 4 avg_temp: 461.30545
SimLab 백그라운드 동작 중
pisode: 3267 Time: 37.3676884174346 avg_temp: 451.234436
min_temp: 421.152466 Reward: [-0.8459727]
min_temp: 421.152466 Reward: [-0.71916599]
min_temp: 421.152466 Reward: [-0.83992652]
min_temp: 421.152466 Reward: [-0.78906281]



**ALTAIR** 

✤ Heat Sink Optimization







✤ Result



사전에 아무 지식도 주지 않았음에도 시행착오를 거쳐 표면적이 최대가 되는 방향으로 모델 생성





# Conclusion

- Extruder

울과학기술대학교



### Extruder

#### Analysis of Initial design

#### 1st Optimization









### Extruder







### Extruder

#### Analysis of Initial design

#### 2nd Optimization







# Thank You

#### Contact

WoonHong Min SeongJun Hong bork7425@seoultech.ac.kr breakths19@seoultech.ac.kr



