

소화탄 탑재를 위한 드론 최적화 및 설계 자동화

Team 드론119



INDEX

- 01 Introduction
- 02 Grenade Case Optimization
- 03 Battery Case Optimization
- 04 Drone Optimization

INDEX

Grenade Case Optimization

Nonlinear Static Analysis



Parametric Optimization



Predicting Response



Mode Analysis



Frequency Response Analysis

Battery Case Optimization

Aerodynamic Analysis



Thickness Optimization



safety rate

Introduction

Research Background

Research Specification

Reference Model

01 Research Background

2025년 발생 대형 산불 재난 사례

2025 경북 산불



- 2025년 경북 산불은 약 2,800ha의 산림을 태우며 전국적 재난으로 확대
- 야간 진화 장비 및 전술 부재로 야간 동안 화재 확산방치

2025 LA 산불



- 2025년 LA 산불은 강풍으로 인한 빠른 확산으로 진압에 2주가 소요됨
- 초기에 신속한 진압이 중요

➤➤➤ 야간 •험지에서도 화재 발생 즉시 신속하게 운용이 가능한 **무인 기반 정밀 화재 진압 시스템**의 도입 필요

01 Research Background

현 국내 주요 소방 장비

소방차



- 산악지역, 고층 건물 상층부에 대한 접근성 부족
- 교통정체, 주차차량 등으로 인한 출동 속도 저하

소방 헬기



- 야간 운용이 불가하여 밤 사이 확산 차단 실패
- 고비용, 운용 효율성 낮음

➤➤➤ 대형 화재나 특수 상황에서도 안정적으로 운용 가능한 **저비용, 고효율**의 소화 장비 개발이 필요

01 Research Background

Advantage Of Drone In Fire Disaster

>>> 현 소화 장비의 한계들을 극복할 수 있으며, AI의 접목을 통해 더욱 **효율적인 화재 진압**이 가능한 **드론**을 새로운 소화 장비로 결정



02 Research Specification

행정안전부 재난안전기술개발 범정부 시행계획 : 가스하이드레이트 소화탄 개발

가스하이드레이트 소화탄 개발

Goal

- **(난 접근성)** 고층 건물, 산불 등 대형화재를 진압할 수 있는 신개념 소화제·탄 및 능동진압 플랫폼 개발(과기·행안·산업·소방 / '23~'27)
- **(신개념 소화제·탄)** 가스하이드레이트 입자 내에 고밀도 소화가스 (0.9 g/cm³ 이상)을 충전(공기저장 최소화)시켜 먼 곳까지 날릴 수 있도록 개발
 - ※ '23 가스하이드레이트 소화약제 및 팽창매커니즘 개발 → '24 가스하이드레이트 소화탄 및 투척시스템 개발 → '25~'27 시가전 소화탄 활용 화재대응 시스템 개발 및 실증
- **(무인 능동 진압)** 현장 영상 기반의 화재 감지(시 정확도 94%), 신개념 소화탄을 활용한 장거리 원격 투척(드론 활용) 등 지능형 플랫폼 구축
 - ※ '23 화재 영상 DB 구축/분석 등 → '24~'25 인공지능화 → '26~'27 실증/고도화/상용화



행정안전부 재난안전기술개발 범정부 시행계획에 따라, 한국생산기술연구원에서 가스하이드레이트 소화탄 개발이 완료된 상태

가스하이드레이트 소화탄 자원



- 직경 약 200mm, 무게 약 500g의 구형 가스하이드레이트 소화탄으로 반경 3m 이상의 넓은 유효 소화구역 확보 가능
- **경량성, 소화 효율** 면에서 강점

정부는 정부 국책 R&D 사업의 방향에 따라, 드론에 탑재된 가스하이드레이트 **소화탄 투척**을 이용한 화재진압 방식 선정

02 Research Specification

행정안전부 재난안전기술개발 범정부 시행계획 : 소화탄 투척용 드론 개발

소화탄 투척용 드론 개발

Goal

- (난 접근성) 고층 건물, 산불 등 대형화재를 진압할 수 있는 신개념 소화제·탄 및 능동진압 플랫폼 개발(과기·행안·산업·소방 / '23~'27)
- (신개념 소화제·탄) 가스하이드레이트 입자 내에 고밀도 소화가스 (0.9 g/cm³ 이상)를 충전·공기저항 최소화시켜 먼 곳까지 날릴 수 있도록 개발
 - ※ '23 가스하이드레이트 소화약제 및 행정매커니즘 개발 → '24 가스하이드레이트 소화탄 및 투척시스템 개발 → '25~'27 시가전 소화탄 활용 화재대응 시스템 개발 및 실증
- (무인 능동 진압) 현장 영상 기반의 화재 감지(시 정확도 95%), 신개념 소화탄을 활용한 장거리 원격 투척(드론 활용) 등 지능형 플랫폼 구축
 - ※ '23 화재 영상 DB 구축/발사체 등 → '24~'25 인공지능화 → '26~'27 실증/고도화/상용화



- 드론 전문 기업 Gryphon Dynamics사에서 국내 최초로 투척 드론의 개발이 완료된 바가 있지만, 이는 30kg의 고중량 소화 분말 투척용 드론이며 이후 개발된 화재 진압용 드론들도 고중량 드론
- 기존 소화약제 대비 경량화에 성공한 가스하이드레이트 소화탄에 적용하기에는 오버스펙이며 높은 생산단가 형성

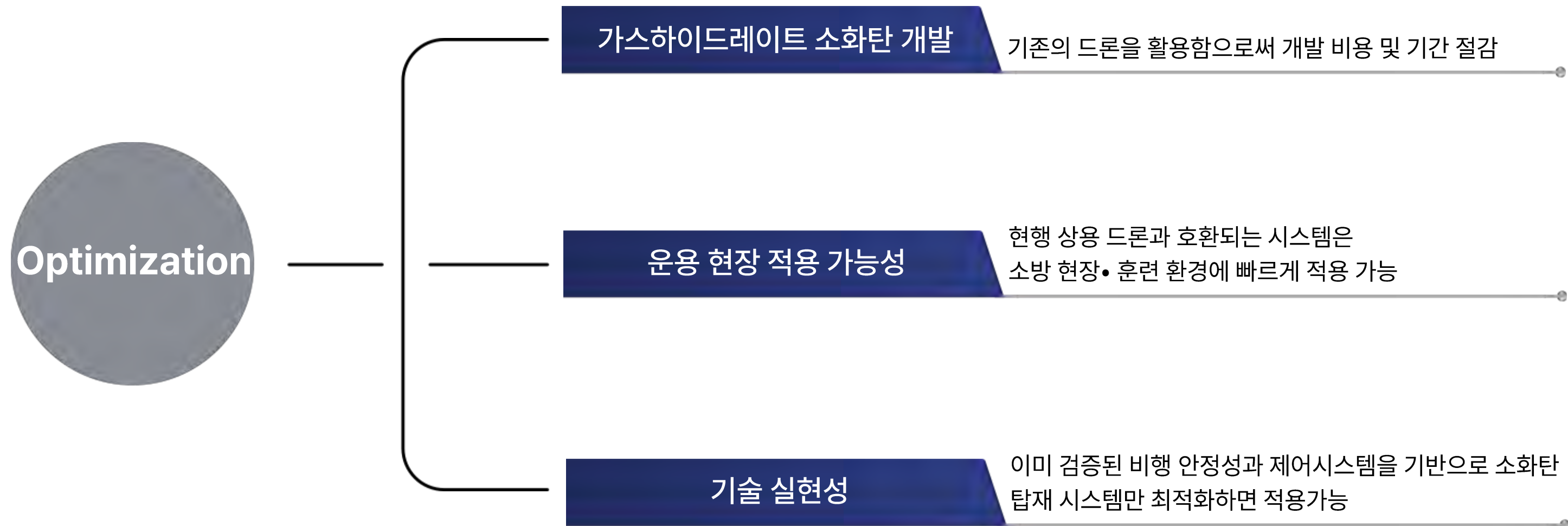
- 다수의 경량 드론을 활용한 군집 투하 방식이 고중량 단일 드론보다 넓은 소화범위 확보에 더 효율적
- 가스하이드레이트 소화탄의 경량성이라는 이점을 활용하기 위해 가스하이드레이트 소화탄 전용 드론 개발이 필요

➤➤➤ 현재 개발된 소화탄 투척용 드론은 고중량 모델로, 기존 소화탄보다 경량화된 가스하이드레이트 소화탄에 대해서는 과설계

➤➤➤ 소화 효율을 위해 광역·동시 대응이 가능한 가스하이드레이트 소화탄 전용 드론 개발이 필요

02 Research Specification

가스하이드레이트 소화탄 탑재 드론의 개발 방향



➤➤➤ 최적화를 통해 얻는 이점에 주목하여, 가스 하이드레이트 소화탄의 탑재가 가능하도록 기존 드론을 최적화

Research Objective

- 가스하이드레이트 소화탄 탑재를 위한 드론의 최적화
- 설계 자동화를 통해 다양한 드론 모델에 대해 신속한 적용

03 Reference Model

Model



[DJI Matrix 300 RTK]

Model Specifications

Model Specifications	
최대 탑재 하중	2.7kg
최대 이륙 무게	9kg
내풍 가능 최대 풍속	12m/s
최대 비행 시간	55분
최대 하강 속도	5m/s
최대 속도	23m/s

➤➤➤ 화재 현장의 특수성을 감안하여, 내풍 가능 풍속, 비행시간 등을 고려하여 **DJI Matrix 300 RTK** 모델을 Reference Model로 선정

Project 1 : Grenade Case Optimization

Nonlinear Static Analysis

Parametric Optimization

Predicting Response

Mode Analysis

Frequency Response Analysis

Project 1

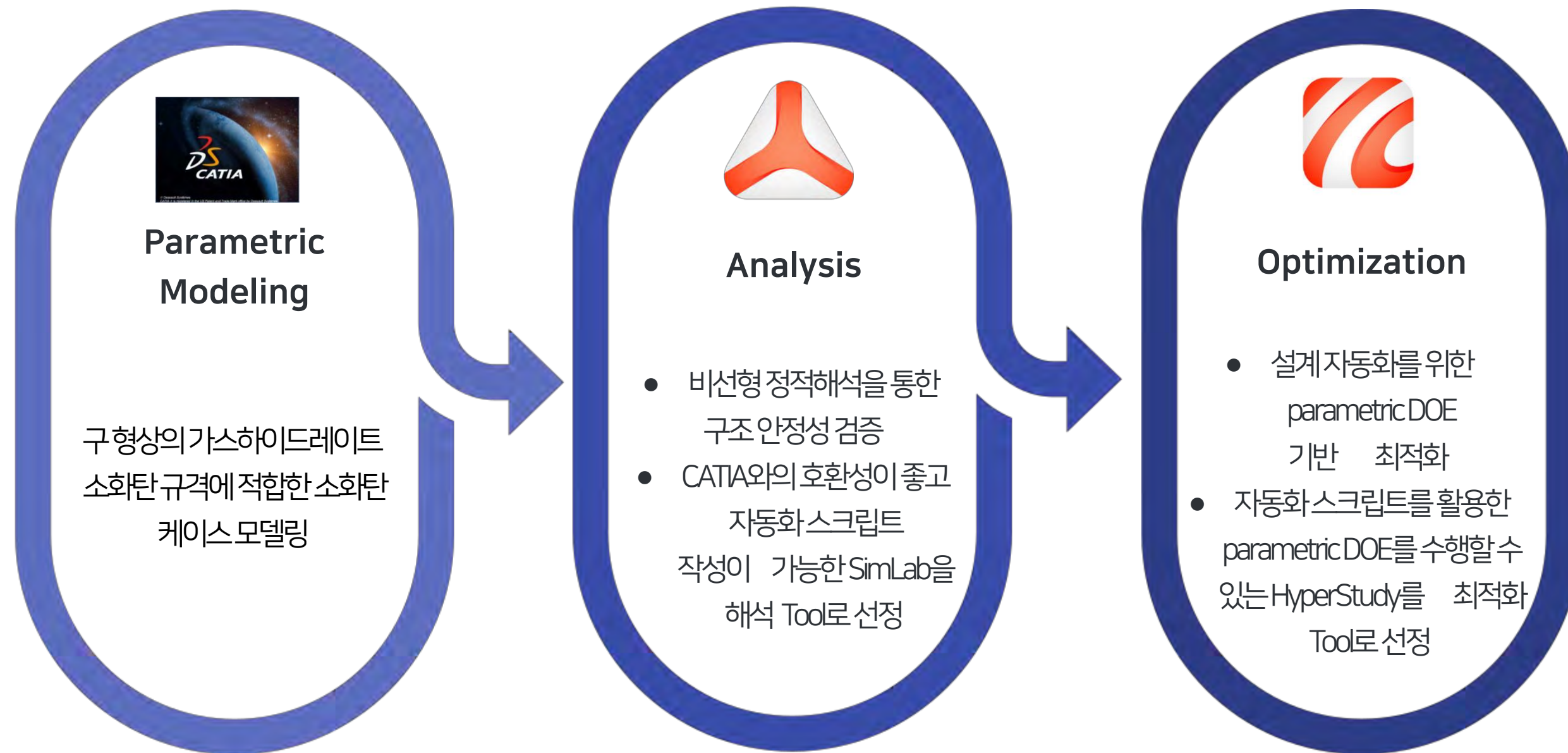
: Grenade Case Optimization

Nonlinear Static Analysis



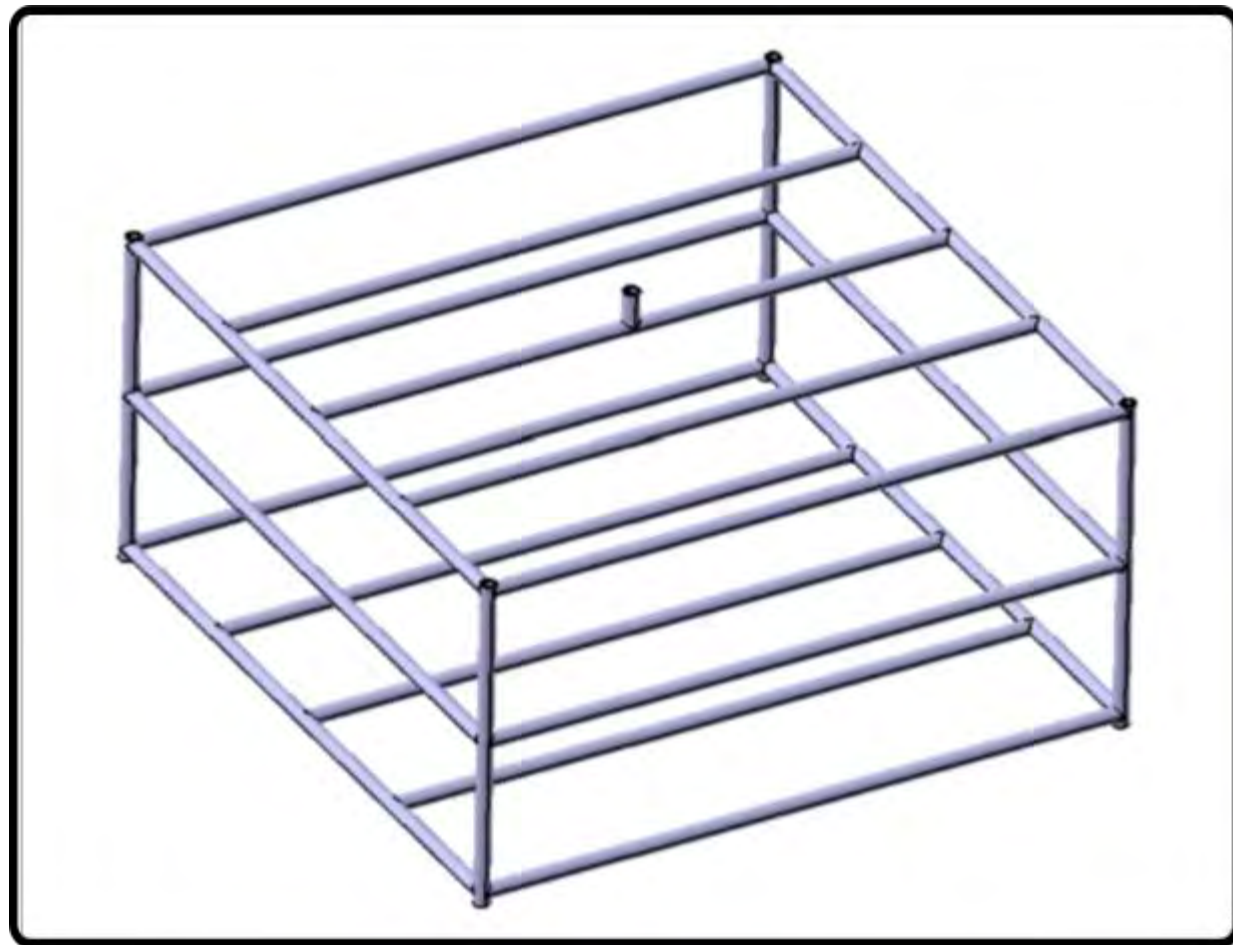
01 Outline

WorkFlow : SimLab - HyperStudy를 이용한 Parametric 최적화 프로세스



01 Outline

Initial Research Design



Initial Model

가스하이드레이트 소화탄에 대한 특허의 규격에 따라 직경 200mm, 무게 500g의 구 형상의 소화탄을 탑재할 수 있는 케이스 모델링

Landing Gear

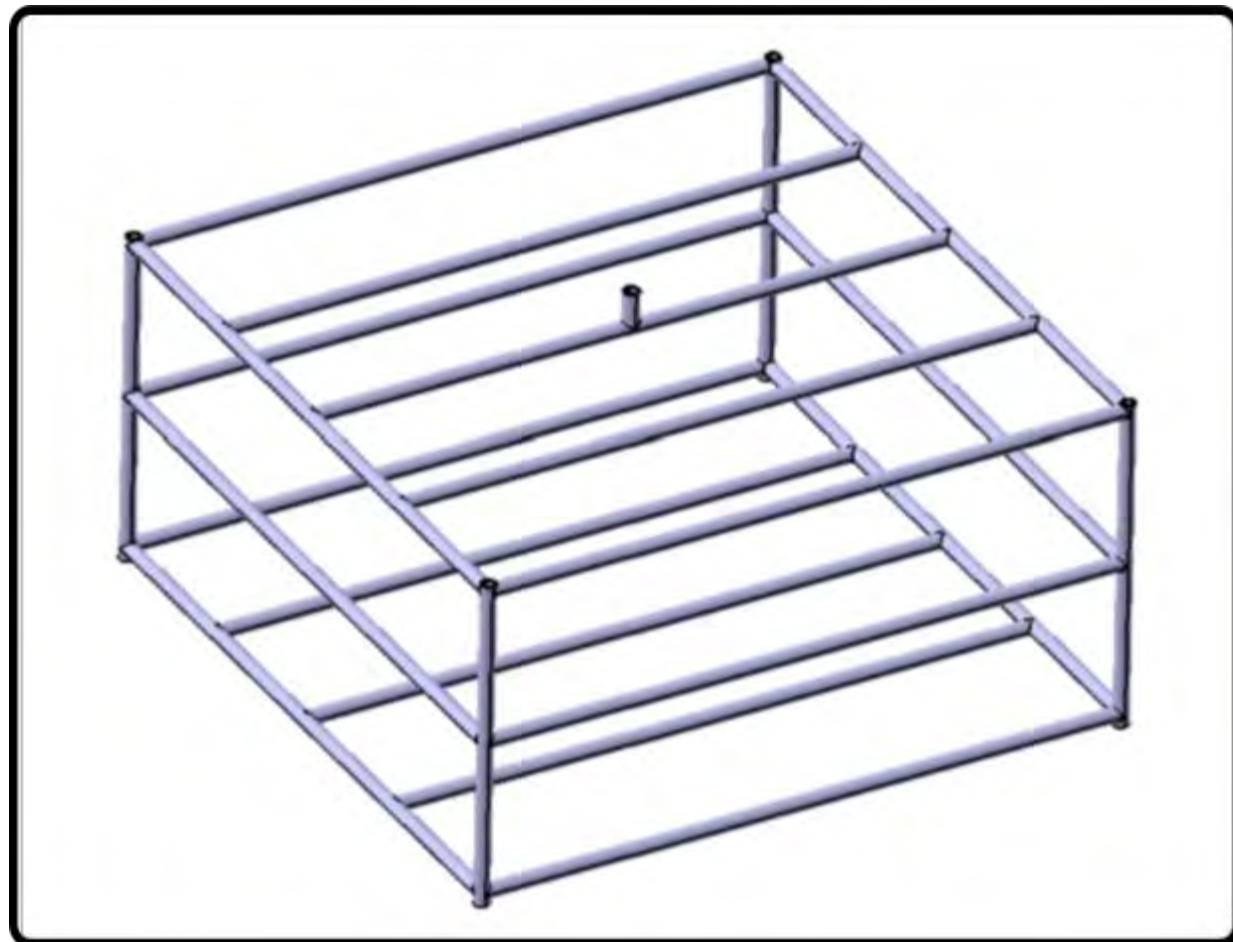
드론 하부에 탑재되는 소화탄 케이스로 랜딩기어의 대체가 가능

Abstract

랜딩기어의 역할도 수행할 소화탄 케이스의 착륙 상황에서 구조 안전성 확보 필요

01 Outline

Research Design



Maximum payload

대표 모델 DJI Matrix 300 RTK의 최대 탑재 하중 2.7kg은 드론이 본체와 배터리 외에 추가로 실을 수 있는 장비의 무게를 의미

Requirement

소화탄 탑재 케이스의 무게는 DJI Matrix 300 RTK에 지원되는 열화상 카메라 DJI Zenmuse XT S의 무게 270g, 가스하이드레이트 소화탄 4개의 무게 2kg을 제외한 0.43kg보다 가볍게 설계되어야함

Problem

반경 R : 5 mm, 두께 T : 1.5 mm로 디자인한 초기 모델은 0.956kg으로 허용 무게인 0.43kg을 훨씬 초과

Abstract

구조안전성을 보장함과 동시에 케이스의 경량화를 목표로 한 최적 설계가 필요

01 Outline

Problems & Solution

1

선형 해석의 한계 극복

선형 해석만으로는 국부 항복, 접촉 응력, 큰 변형 등을 정확히 예측할 수 없음

2

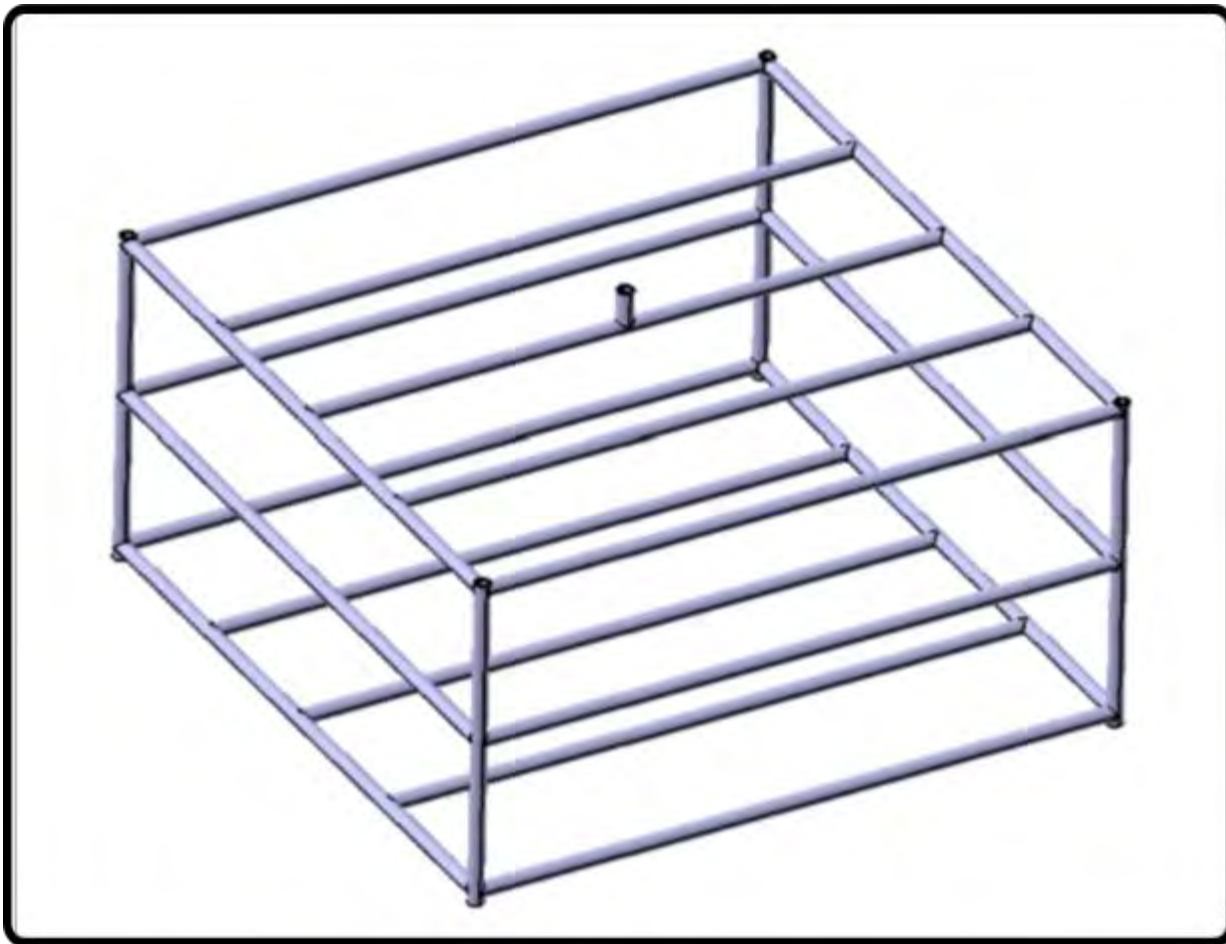
소성 및 좌굴 거동 고려

케이스의 소재로 선택한 AL6061-T6 재료는 항복 이후 비선형 소성 특성을 보이며, 파이프 구조는 좌굴에 취약함

➤➤➤ 구조물의 신뢰성 있는 평가를 위한 비선형 재료의 물성치 파악 및 비선형 정적 해석의 수행

02 Analysis

Parametric Modeling : CATIA Model의 Parametric Design 수행



Design Parameter

Al6061-T6 파이프의 반경 R과 두께 T를 각각 5mm, 1.5mm로 설정

Parameter Design

SimLab에 Cad Parameter를 함께 import 하기 위해 CATIA의 매개변수 기능을 활용

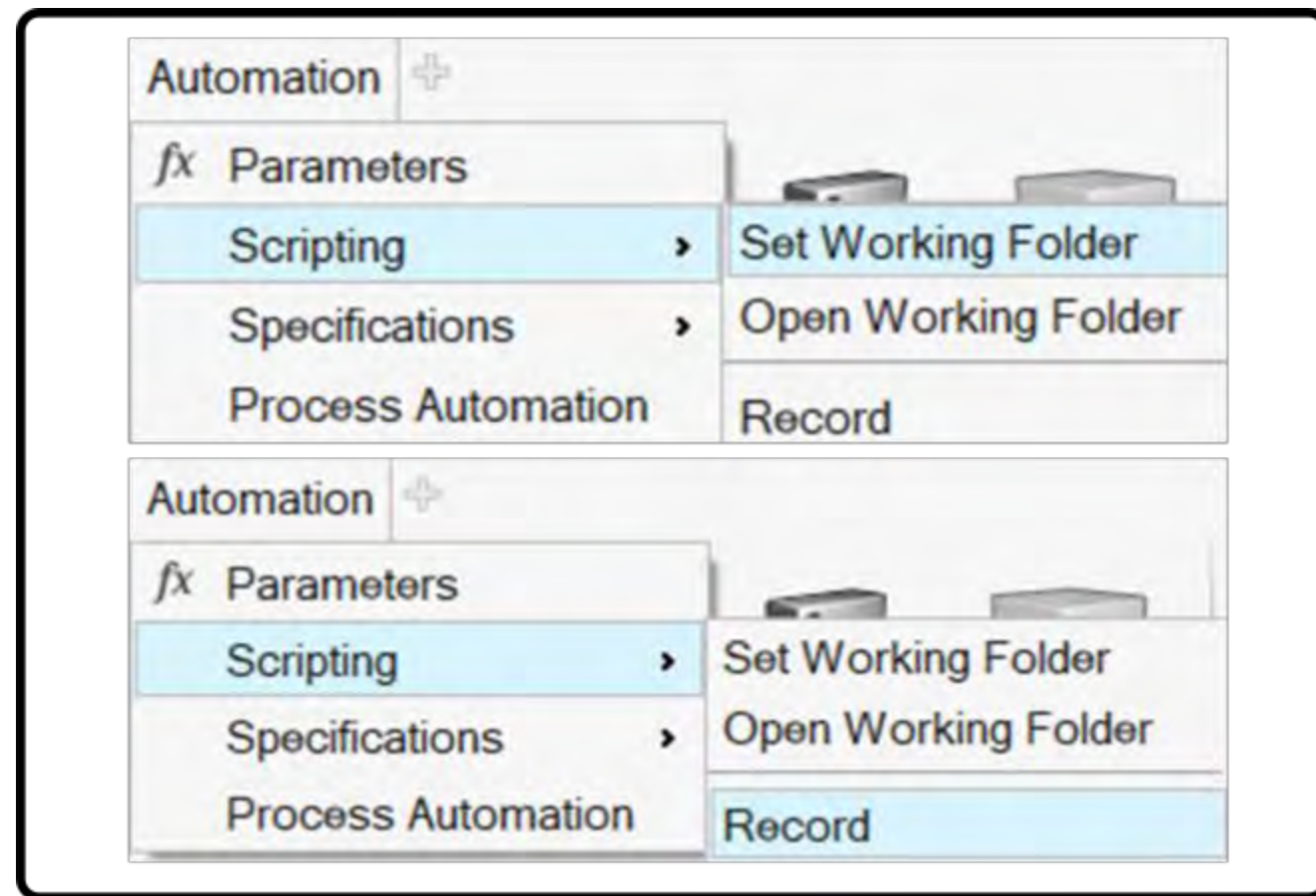
Publication

SimLab - HyperStudy를 이용한 parametric 최적화 프로세스를 위해 CATIA Publication 설정



02 Analysis

Automation : Simlab 자동화 스크립트 작성



Set Working Folder

자동화 스크립트 작성 폴더 선택

Record

SimLab UI 상에서 사용자가 클릭하여 수행한 기능들을 자동으로 python 코드로 변환하는 개념의 자동화 스크립트 작성

Import : Catia Model의 Import Options



Design Parameter

Catia의 parameter 정보를 Simlab으로 함께 import

Publicaitons

자동화된 parametric DOE를 수행할 때 형상 변경 시 Face ID가 달라져 하중 및 구속 조건이 제대로 인식되지 않는 문제를 방지하기 위해, 해석 조건이 적용된 면들을 publications 기능으로 그룹화하여 안정적인 해석 결과 확보가 가능



02 Analysis

Mesh : Fine Meshing

Surface Mesh

Select bodies or faces

Element Type:

☒ Tri3

☐ Tri6

☐ Quad4

Mesh Size:

☒ Average element size 3 mm

☐ Maximum element size 0 mm

Minimum element size 0.3 mm

Grade factor 1.5

Geometry Approximation:

Maximum angle per element 45 deg

Curvature minimum element size 1.5 mm

Surface Mesh Quality:

Aspect ratio 10

☒ Identify features and mesh on CAD body

☒ Merge tiny fillets

☐ Create matching mesh (Parasolid)

Advanced Options

OK Cancel

Tet Mesh

Element Type:

☒ TET4

☐ TET10 straight edge

☐ TET10 curved edge

Mesh Size:

Average element size 3 mm

☐ Maximum element size Default

Internal grading 2

Quality:

Minimum value 0.1 Quality 1 Stretch Maximum value 1

☐ Identify features and mesh on CAD body

☐ Merge tiny fillets

☐ Create matching mesh (Parasolid)

☒ Transfer mesh control from CAD

Advanced Options

Surface mesh parameters for CAD input

Apply OK Cancel

Quality Check

Element Type	Element Quality	Compute	Min Value	Max Value	Condition	Limit Value	% Failure	Display	Clean Up
Tri	Aspect Ratio	☒	1.027	14.688	>=	10	0.001	☐	☐
Quad	Edge Length	☒	0.486 mm	6.398 mm	<	0 mm	0	☐	☐
Tet					>=	100 mm	0		
Hex	Interior Angle	☒	3.819 deg	154.872 d	<	10 deg	0.002	☐	☐
Wedge					>	160 deg	0		
Pyramid	Stretch	☐			<	0.10		☐	
	Skew	☒	2.125 deg	83.158 deg	>	75 deg	0.002	☐	☐
	Element Face Angle	☐			<	45 deg		☐	
	Area	☐			<	0 mm2		☐	
	Mid-Node Offset : Ratio	☐			>	0.5		☐	
	Mid-Node Offset : Distance	☐			>	0.5 mm		☐	
	Intersection	☐			<	0.1		☐	

☐ Select all ☐ Deselect all Options Compute Write Report Display CleanUp Cancel

Quality Check

유한요소해석결과는 Mesh Quality에 민감하게 반응하므로 Quality Check 기능을 활용해 Surface 및 Tet mesh의 quality 저하 요소를 확인하여 Fine Meshing을 수행



02 Analysis

Material : Ramberg Osgood Equation을 이용한 S-S Curve 도출

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad \varepsilon_{us} = 100 \left(\varepsilon_r - \frac{\sigma_{tu}}{E} \right) \quad n = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{us}}{0.2}\right)}{\ln\left(\frac{\sigma_{tu}}{\sigma_0}\right)}$$

($E = 71500 \text{ MPa}$, $\sigma_{tu} = 310 \text{ MPa}$, $\sigma_0 = 300 \text{ MPa}$, $\varepsilon_r = 0.12$)
(0.2% offset 가정 시, $\alpha = 0.002$)

6061-T6

6xxx

2.7E-9 - 2.713E-9 Mg/mm³
Density

68260 - 71500 MPa
Young's Modulus

0.3 - 0.33
Poisson's Ratio

300 MPa
Yield Strength

- 금속 재료의 Stress와 Strain 사이의 비선형성을 나타내기 위한 이론
- 탄성계수, 항복강도, 극한강도, 연신율을 통해 Stress-Strain Curve Plot
- Al6061-T6의 물성치는 Altair Material, Matweb 참고



02 Setup

Simlab을 이용해 작성한 Automation Script 활용

+ Add Model Remove Model Model Resources					
	Active	Label	Varname	Type	Resource
1	☒	SimLab 1	m_1	SimLab	C:\caselandingsimlab\caselandingsimlab.py

1

Define Models

	Active	Label	Varname	Lower Bound	Nominal	Upper Bound	Comment
1	☒	R	var_1	3.0000000 ...	3.5000000 ...	4.0000000 ...	...
2	☒	T	var_2	1.1000000 ...	1.2000000 ...	1.3000000 ...	...

2

Define Input Variables

반경(R)과 두께(T)를 설계 변수로 정의 및 범위 설정



02 Analysis

Material 생성

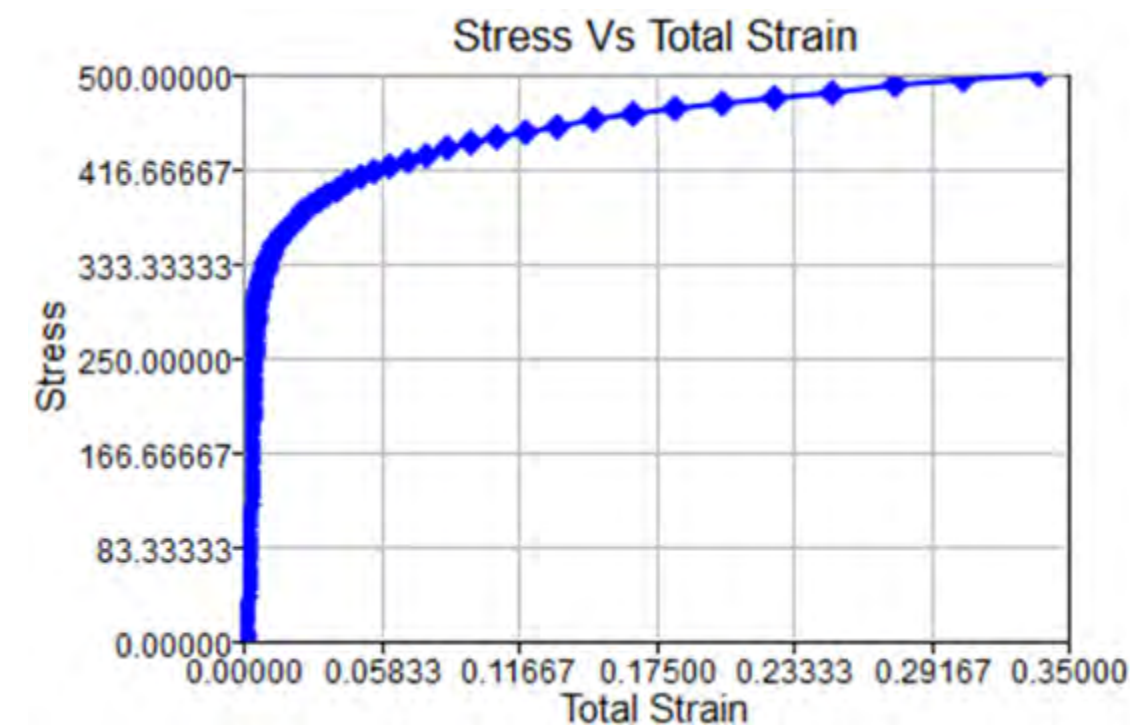
Create Material

Name: al6061t6
Material ID: 1
Category: Solid
Class: Metal
Model: Isotropic

Name	Value	Table
Density	2.7e-06 kg/mm3	none
Mechanical Properties		
Elastic		
Youngs_modulus	71500 MPa	none
Poissons_ratio	0.3	none
Shear_modulus		none
Thermal_expansion	0 /C	none
Reference_Temperature	20 C	
Damping_coefficient		
Plastic		
Yield stress-strain table		FldTable1
Work hardening slope		
Hardening rule	Isotropic Hardening	0.150000
Initial yield point	300 MPa	

Description:

OK Cancel

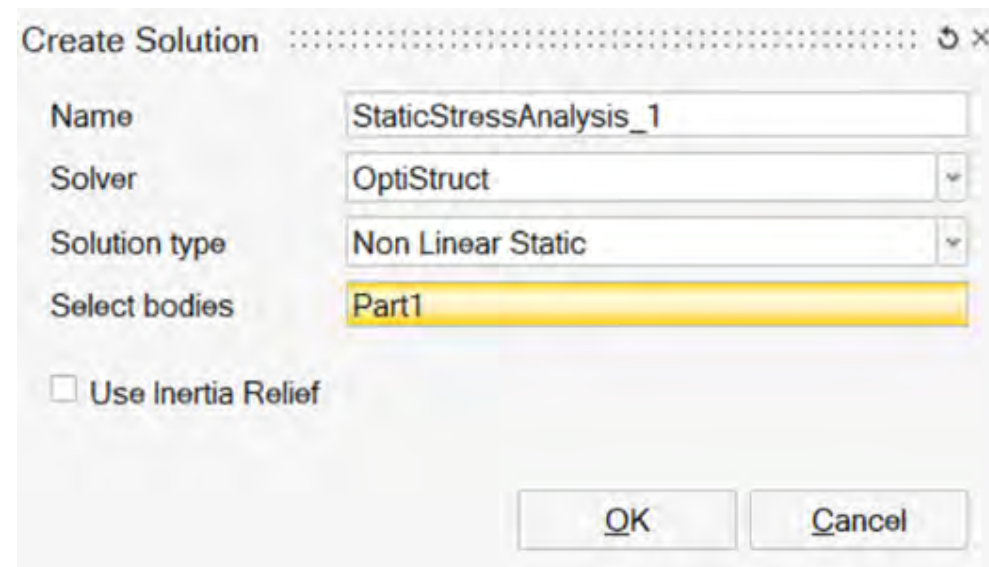


- Density, Youngs Modulus, Initial Yield Point 등 Al6061-T6 물성치 정보 입력
- Ramberg Osgood Equation을 이용해 S-S Curve 도출 후 SimLab에 대입



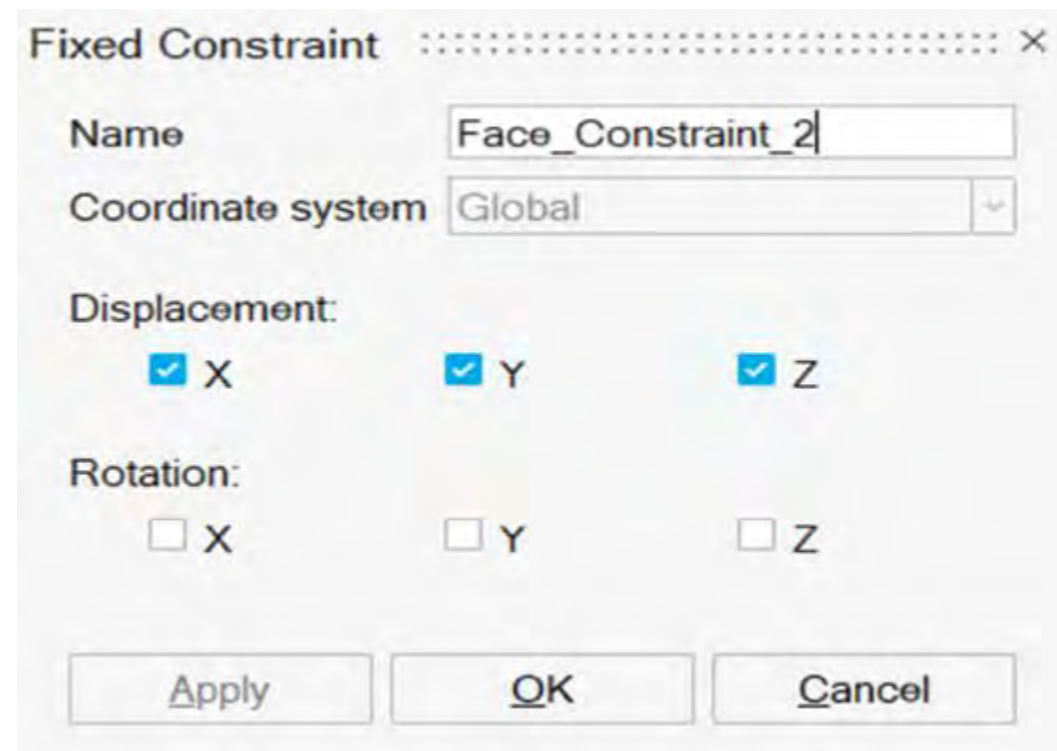
02 Analysis

Create Solution & Constraint : 비선형 정적 해석을 위한 Solver 및 구속 조건 설정



Create Solution

비선형 소성 및 접촉 거동을 고려하기 위해 Nonlinear Static 해석 유형과 optistruct solver를 선택하여 해석 솔루션을 구성



Constraint

드론과 기계적으로 연결되거나 변형이 제약되는 부분에 고정 구속조건을 적용



02 Analysis

Create Load : 착지 시 발생하는 충격량을 기반으로 구조물에 작용하는 하중의 크기 정의

Force and Moment

Name: Force_3

Coordinate system: Global

Force:

☒ Total

X: 0 N Y: 0 N Z: -2250 N

Distribute over nodes on face / edge:

☒ Use shape function

☐ Divide equally on all nodes

☐ Node force on each node

☐ As a function of XYZ

None Create

Moment:

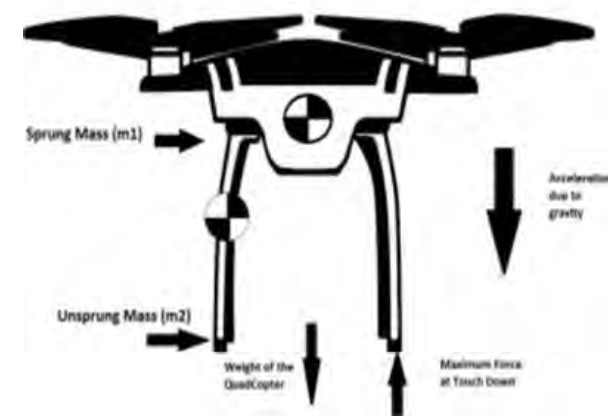
X: 0 N*mm Y: 0 N*mm Z: 0 N*mm

Time dependent load magnitude

None Create

Apply OK Cancel

Landing



- 소화탄 케이스의 파단 시 소화탄의 추락으로 인한 사고위험 존재
- 다양한 착지 조건에서도 구조적 신뢰성을 확보할 수 있는 보수적 설계 기준 필요
- 쿼드콥터의 착지 시나리오를 모델링한 기존 문헌 기반 연구를 참조하여, 최대 하중이 작용하는 단일 접촉점 착지(hard one-point landing) 상황을 기준으로 분석

Load

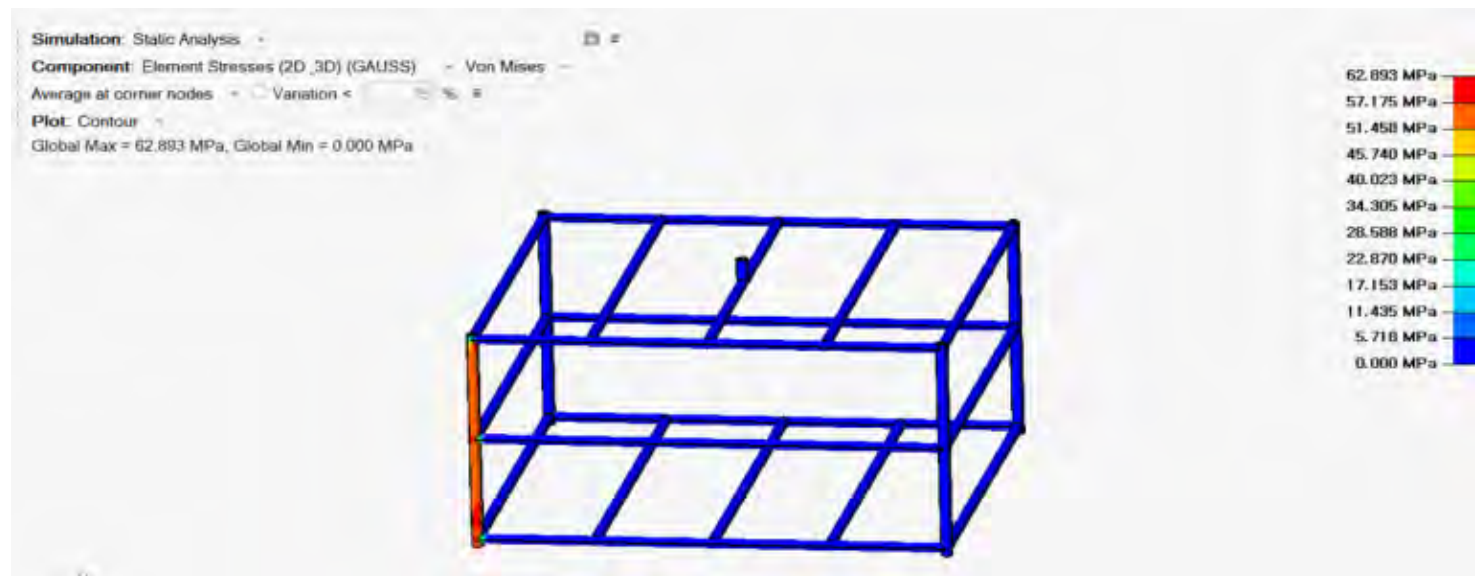
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{9 \times 5}{0.02} = 2250N$$

충격량 기반 분석을 통해, 착지 시 작용하는 하중을 시간에 따른 운동량의 변화로 정의



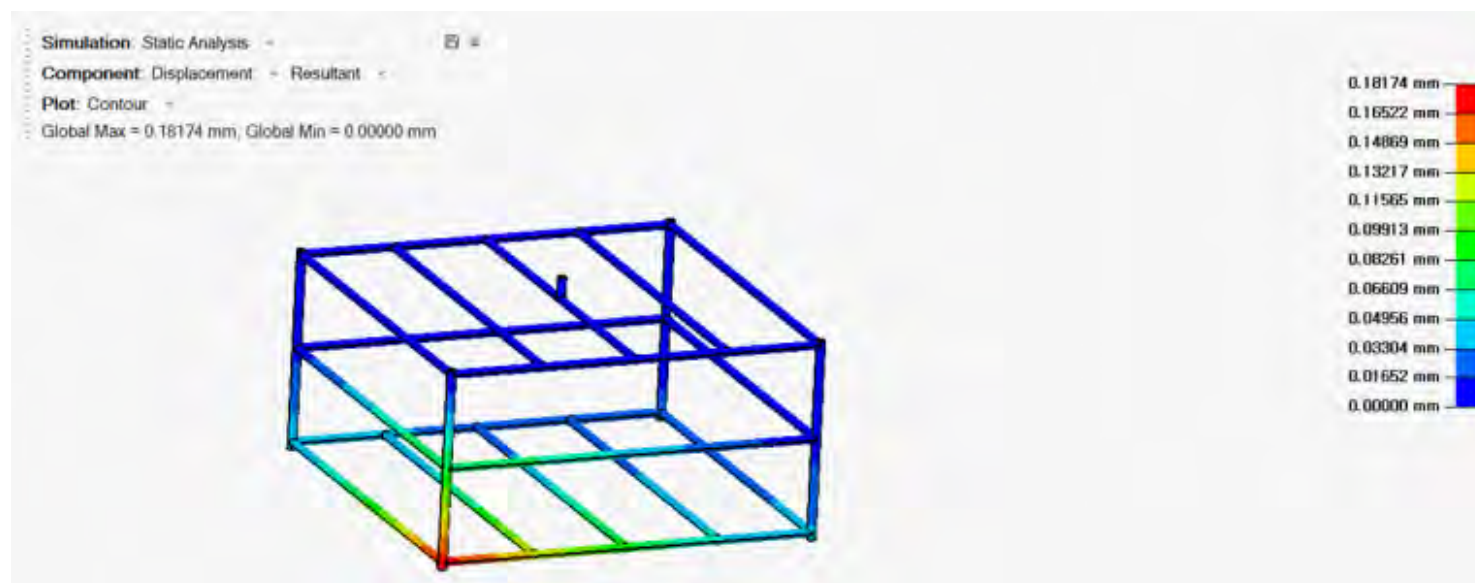
03 Result

구조적 안정성을 확보함과 동시에 무게를 최소화하기 위한 설계 변수(Parameter)의 최적 조합을 도출하여, 기능을 만족하면서 경량화를 달성하는 것을 목표로 설정



구조 안정성

Max_Stress 값이 62.893 MPa로 Al 6061-T6의 항복강도인 300 MPa보다 훨씬 작은 값이고 Max_Displacement 또한 0.18174mm이므로 구조적으로 안정하다고 판단



과설계

- Factor Of Safety가 약 4.77로 일반적인 드론 랜딩기어에 해당하는 요구 수준을 상회하며, 이때의 Mass는 약 0.956kg
- 과도한 안전 여유로 인한 재료가 낭비되고 있다는 것을 의미하며, 가스하이드레이트 소화탄 탑재를 위한 구조 최적화를 통해 케이스를 목표 질량인 0.43kg 이하로의 경량화가 필요

Project 1

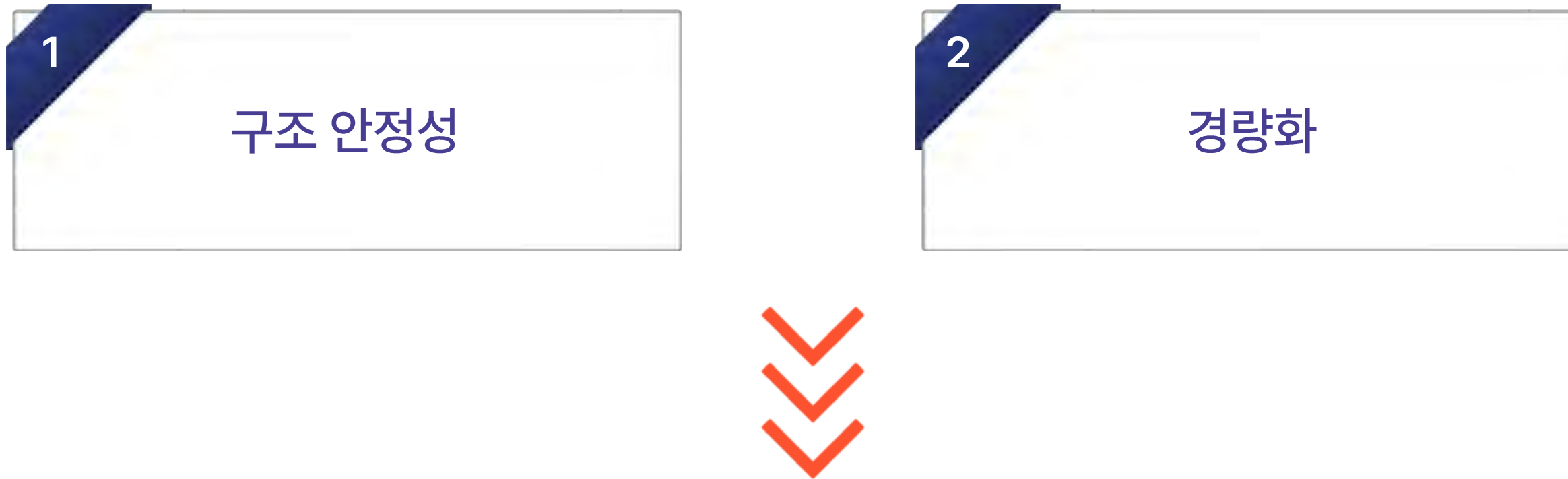
: Grenade Case Optimization

Parametric Optimization





01 Outline



Research Objective

구조적 안정성을 확보함과 동시에 무게를 최소화하기 위한 설계 변수(Parameter)의 최적 조합을 도출하여, 기능을 만족하면서 경량화를 달성하는 것을 목표로 설정

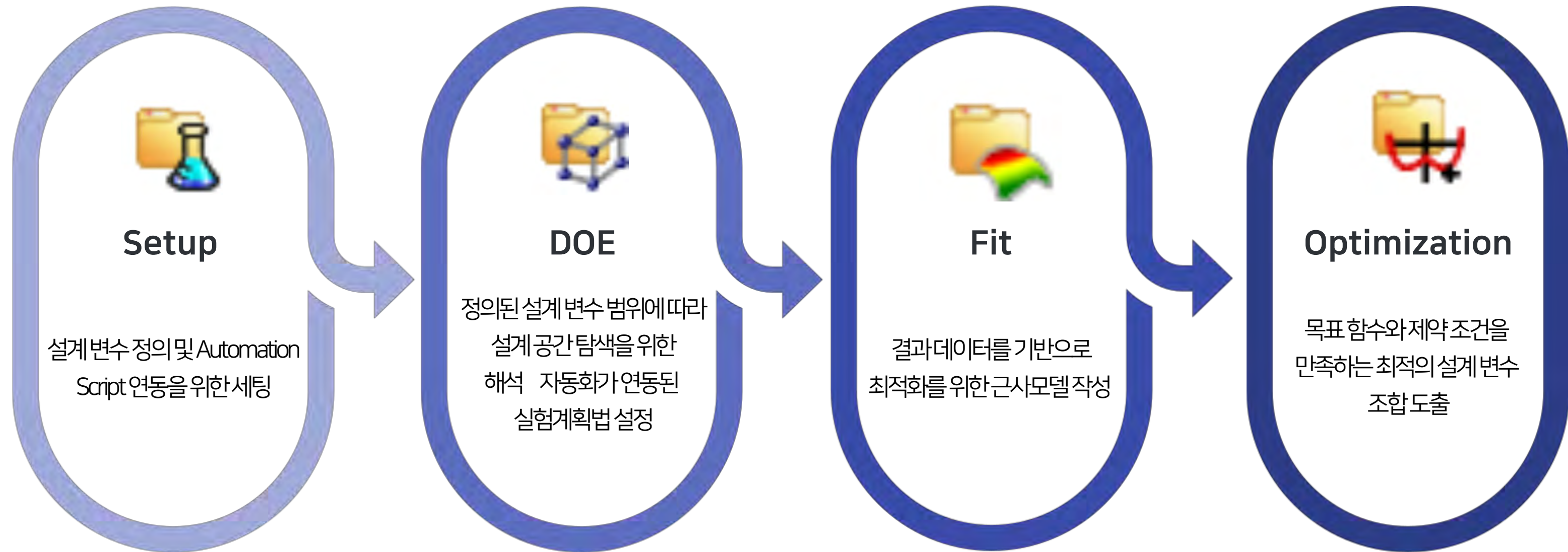
Tool Selection

구조 안정성과 경량화라는 목표를 동시에 만족하는 최적 해를 탐색하기 위해, **HyperStudy**를 이용해 기반의 자동화된 Parametric DOE 및 최적화 기능을 활용



01 Outline

HyperStudy WorkFlow





02 Setup

Model Testing과 Responses 정의

	Active	Label	Test				Type
1	☒	SimLab 1	☒ Write	☒ Execute	☒ Extract	☐ All	SimLab

3

Test Models

	Active	Label	Varname	Expression	Value
1	☒	StaticStressAnalysis:Mass	r_1	m_1.StaticStressAnalysis:Mass	0.4860800
2	☒	StaticStressAnalysis:Max_Displacement	r_2	m_1.StaticStressAnalysis:Max_Displacement	0.3502380
3	☒	StaticStressAnalysis:Max_Stress	r_3	m_1.StaticStressAnalysis:Max_Stress	120.90000

4

Define Output Responses



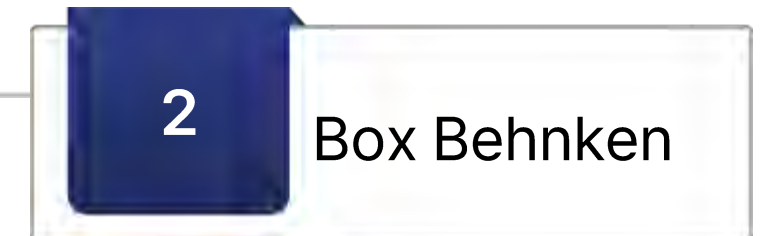
03 DOE

DOE Settings

	Active	Label	Varname	Lower Bound	Nominal	Upper Bound
1	☒	R	var_1	3.0000000 ...	3.5000000 ...	4.0000000 ...
2	☒	T	var_2	1.1000000 ...	1.2000000 ...	1.3000000 ...



☒	Box Behnken	Box	Historic designs described by Box Behnken
----------------------------------	-------------	-----	---



	Value
Design	Auto Select ▼
Number of Runs	13

- 변수 간 상호작용을 반영할 수 있으면서, 중심합성법보다 적은 실험 수로 효율적인 모델링이 가능하여 **Box-Behnken** 방식을 채택
- 추출할 Response 값들은 **Mass, Max_Stress, Max_displacement**



03 DOE

DOE Table 도출

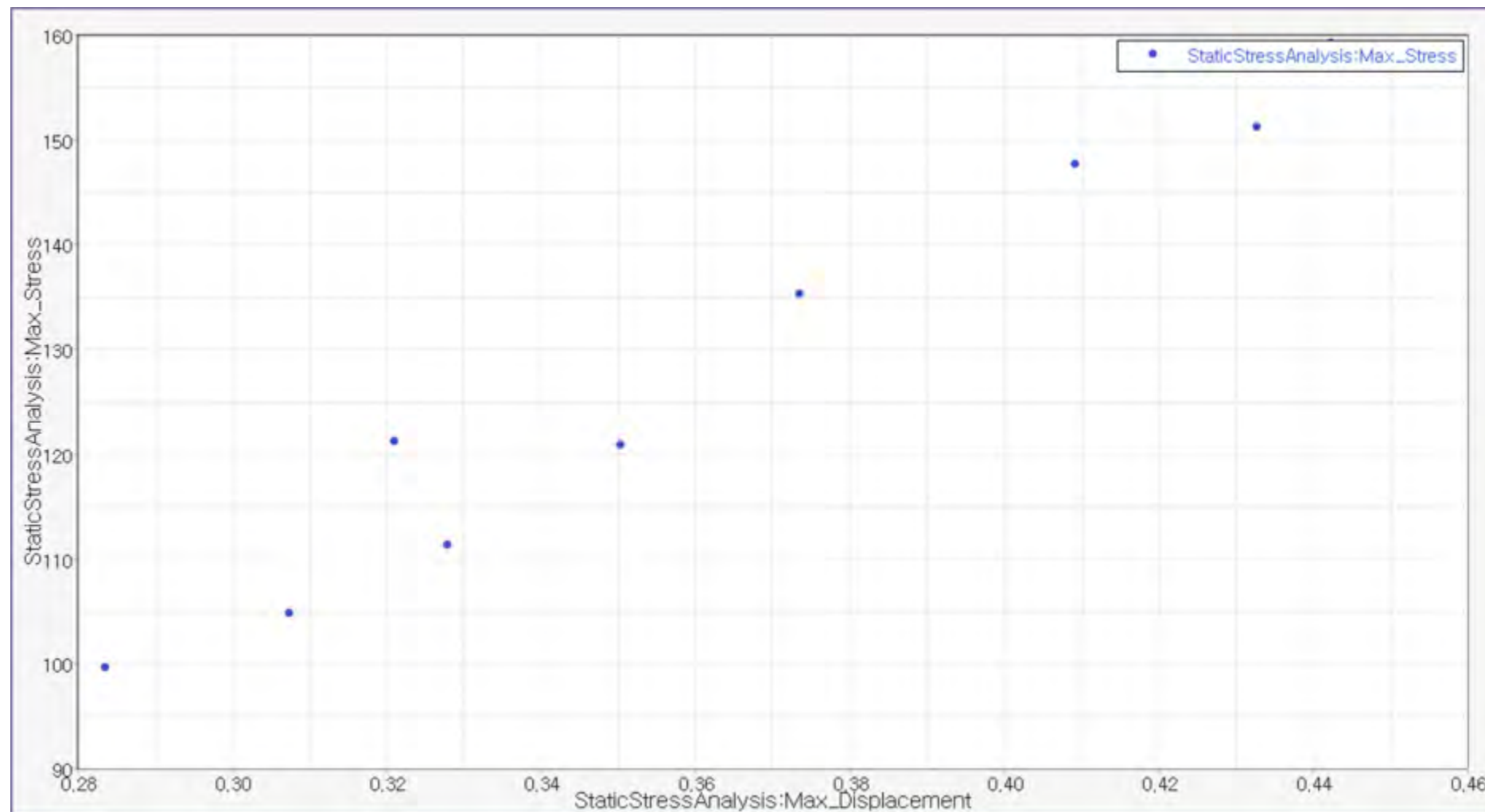
	R	T	Stat...Mass	Stat...ment	Stati...tress	Post Process
1	3.0000000	1.1000000	0.3767580	0.4423010	159.25400	
2	3.0000000	1.3000000	0.4275470	0.4091210	147.76000	
3	4.0000000	1.1000000	0.5202200	0.3278390	111.37200	
4	4.0000000	1.3000000	0.5884350	0.2835400	99.732900	
5	3.0000000	1.2000000	0.4079950	0.4326640	151.23300	
6	3.0000000	1.2000000	0.4079950	0.4326640	151.23300	
7	4.0000000	1.2000000	0.5549700	0.3074050	104.89600	
8	4.0000000	1.2000000	0.5549700	0.3074050	104.89600	
9	3.5000000	1.1000000	0.4574880	0.3733740	135.31500	
10	3.5000000	1.1000000	0.4574880	0.3733740	135.31500	
11	3.5000000	1.3000000	0.5133950	0.3210340	121.30500	
12	3.5000000	1.3000000	0.5133950	0.3210340	121.30500	
13	3.5000000	1.2000000	0.4860800	0.3502380	120.90000	

- 자동으로 설계변수의 수준을 바꿔가며 총 13번의 해석 수행
- 같은 설계 변수 조합이 반복된 것은 DOE Design과정에서의 오류가 아니라, 중심점에 대한 반복 수행으로 해석 결과의 통계적 신뢰도 확보를 추구하는 Box-Behnken 방식의 특성



03 Post

Processing : Scatter



Scatter 분석을 통한 설계 변수 축소 및 모델 간소화

- Max_Stress와 Max_Displacement는 높은 상관관계를 보이며, 이는 재료의 비선형 응력-변형률 거동과 유사한 패턴
- 따라서 최적화에서는 중복 정보인 Max_Displacement를 배제하고, Max_Stress와 Mass만을 설계 Responses로 고려하여 모델 단순화 수행



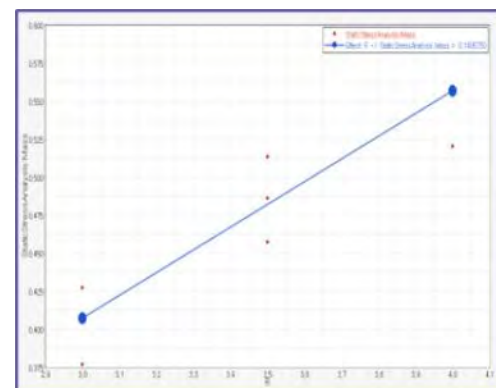
03 Post

Processing : Main Factor Analysis

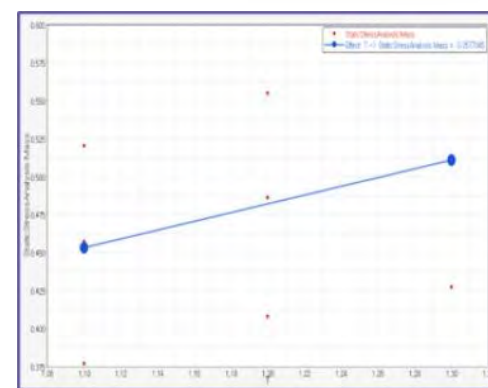
Mass



Pareto Plot

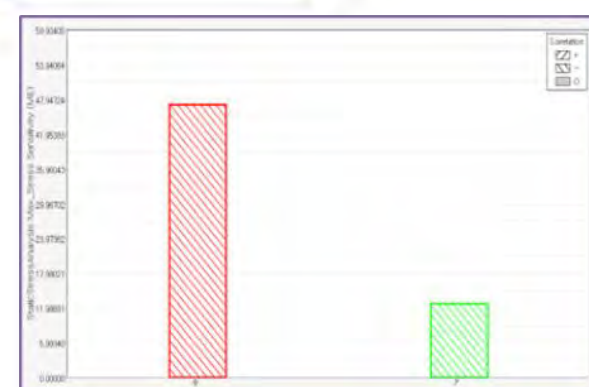


Linear Effect : R

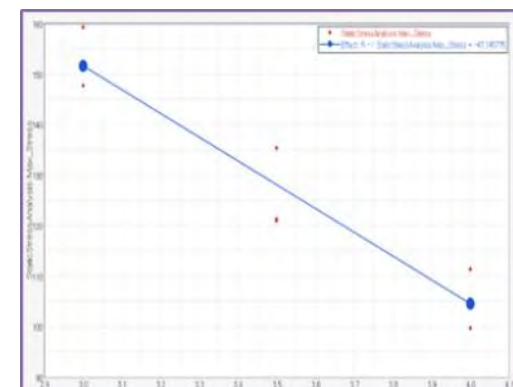


Linear Effect : T

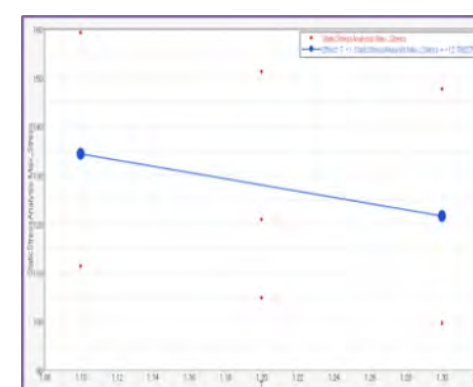
Stress



Pareto Plot



Linear Effect : R



Linear Effect : T

주요 설계 인자 분석 및 최적화 방향 구체화

- Pareto Plot 및 Linear Effect 분석 결과, Mass와 Stress의 경우 모두 영향이 가장 큰 **주요 인자는 R**로 확인
- 초기에 예측한대로 Linear Effect 분석에서 R이 증가할수록 Mass는 증가하지만 Stress는 감소하는 상반된 경향을 보여, 구조 안정성과 경량화를 동시에 달성하기 위한 **설계 변수(R,T)의 최적 조합 도출이 필수적**



04 Fit

높은 결정계수 기반의 Fit 모델을 통해 응답 예측 정확도를 확보하고, 후속 최적화를 위한 신뢰성 있는 반응표면을 구성

	Active	Label	Type	Origin	Origin Settings
1	☒	Matrix 1	I Input ▼	Approach ▼	DOE 1 (doe_1) ▼

Fit Model

- 실험계획법(DOE)를 기반으로 설계변수(R, T)와 응답값(Mass, Max_Stress) 간의 관계를 근사하는 Fit 모델을 작성
- 다양한 수학적 모델(Polynomial, RBF 등)을 활용하여 반응표면(Response Surface)을 구성
- 모델 적합성 평가 결과 모델의 결정계수(R^2)가 각각 1.00(Mass), 0.99(Max_Stress)로 매우 높게 나타나, 설계 공간 내 응답 예측 신뢰도 확보
- 이를 통해 실제 해석 수행 없이도 설계 변수 변화에 따른 응답 경향을 빠르게 예측할 수 있는 기반 마련



04 Optimization

신뢰도 높은 Fit 모델을 기반으로 경량화와 구조 안전성을 동시에 만족하는 최적 설계 조건 설정

Design Goal						
	Active	Label	Value	Goals	Evaluate From	Data Type
1	☒	StaticStressAnalysis:Mass	0.4855692	Minimize	Fit 1, $R^2 = 1.00$	Numeric
2	☒	StaticStressAnalysis:Max_Stress	126.09058	≤ 150.00000	Fit 1, $R^2 = 0.99$	Numeric

Design Goal			
☒	Global Response Search Method	GRSM	Global gradient-based search

- 경량화를 위한 주요 설계 목표로 **Mass는 최소화**, 구조 안전성 확보를 위해 **Max_Stress**는 항복응력(300MPa)에 안전계수 2를 적용한 **150MPa 이하**로 설정
- Fit 모델의 결정계수(R^2)가 각각 1.00(Mass), 0.99(Max_Stress)로 매우 높은 신뢰도를 나타내며, 모델 예측 정확성이 충분히 확보되었으므로 추가적인 보강 없이 해당 조건에서 최적 설계 도출 가능
- 복잡한 설계 공간에서 전역 최적값을 효율적으로 탐색할 수 있는 **GRSM(Global Response Search Method)**을 선택해, 높은 수렴성과 신뢰도 기반의 최적화 수행이 가능하도록 설정



04 Optimization

최적값 도출

R	T	Stat...Mass	Stati...tress	Goal 1	Goal 2
3.5000000	1.2000000	0.4855692	126.09058	0.4855692	Feasible
3.9360000	1.2984000	0.5783893	102.70777	0.5783893	Feasible
3.0976000	1.2974400	0.4465788	142.60382	0.4465788	Feasible
3.9936000	1.1198400	0.5274318	110.78814	0.5274318	Feasible
3.0080000	1.2795840	0.4261969	147.96328	0.4261969	Feasible
3.0000000	1.2102040	0.4075987	151.16855	0.4075987	Violated
3.0000000	1.2617280	0.4203482	149.03926	0.4203482	Feasible
3.0000000	1.1537943	0.3936403	155.08087	0.3936403	Violated
3.0000000	1.2438720	0.4159298	149.67556	0.4159298	Feasible
3.1544240	1.1169732	0.4095508	150.48875	0.4095508	Acceptable



Optimum value	
R [mm]	T[mm]
3.1544240	1.1169732



04 Optimization

Initial Model	
Mass [kg]	
0.956	
Parameter	Value [mm]
R	5
T	1.5



Optimized Model	
Mass [kg]	
0.4095508	
Parameter	Value [mm]
R	3.1544240
T	1.1169732



Optimization Result

초기 모델 대비 질량을 0.956 kg에서 0.410 kg으로 **약 57.1% 경량화**하여, 최대 이륙 무게를 만족하기 위한 **설계 목표인 0.43 kg 이하** 조건을 충족함과 동시에 구조 안정성 또한 확보할 수 있는 최적의 설계 변수 R,T의 조합 도출

Verification

해당 최적화 결과는 Fit 모델의 **결정계수(R^2) 값이 0.99** 이상으로 도출되어 신뢰할 수 있는 데이터 기반의 최적화가 수행되었음을 확인

Develop

- 자동화 스크립트를 활용하여 R, T 변수 변화에 대한 반복 해석 없이 신속한 설계 도출이 가능하도록 시스템화 완료
- 향후 파이프 길이 등 추가적인 설계 변수 변경 시 재해석 부담을 줄이기 위해 Altair Physics AI를 도입하여 **새로운 모델에 대한 응답 예측 체계를 구성**하고자 함

Project 1

: Grenade Case Optimization

Predicting Response



01 Outline

Problem

- 소화탄 탑재 케이스에 대한 자동화된 설계 프로세스를 완성하기 위해, SimLab-HyperStudy를 활용한 Parametric 최적화를 통해 **사전에 정의된 설계변수에 대한 설계자동화는 완료됨**
- 하지만, 최대 이륙 하중이 상이한 타 기체에 본 모델을 적용할 경우, 파이프 길이 등의 추가 설계변수 조정으로 인한 재해석이 필요한 상황 발생 가능성 존재

Research Develop

따라서 Physics Ai 기반의 데이터 학습을 활용하여, 기존 해석결과를 통해 새로운 모델에 대한 respons를 예측하는 접근 방식으로 소화탄 탑재 케이스에 대한 설계자동화를 확장

- 소화탄 탑재 케이스의 다양한 모델에 대한 적용 가능성을 고려하여 **설계자동화의 범위 확장**

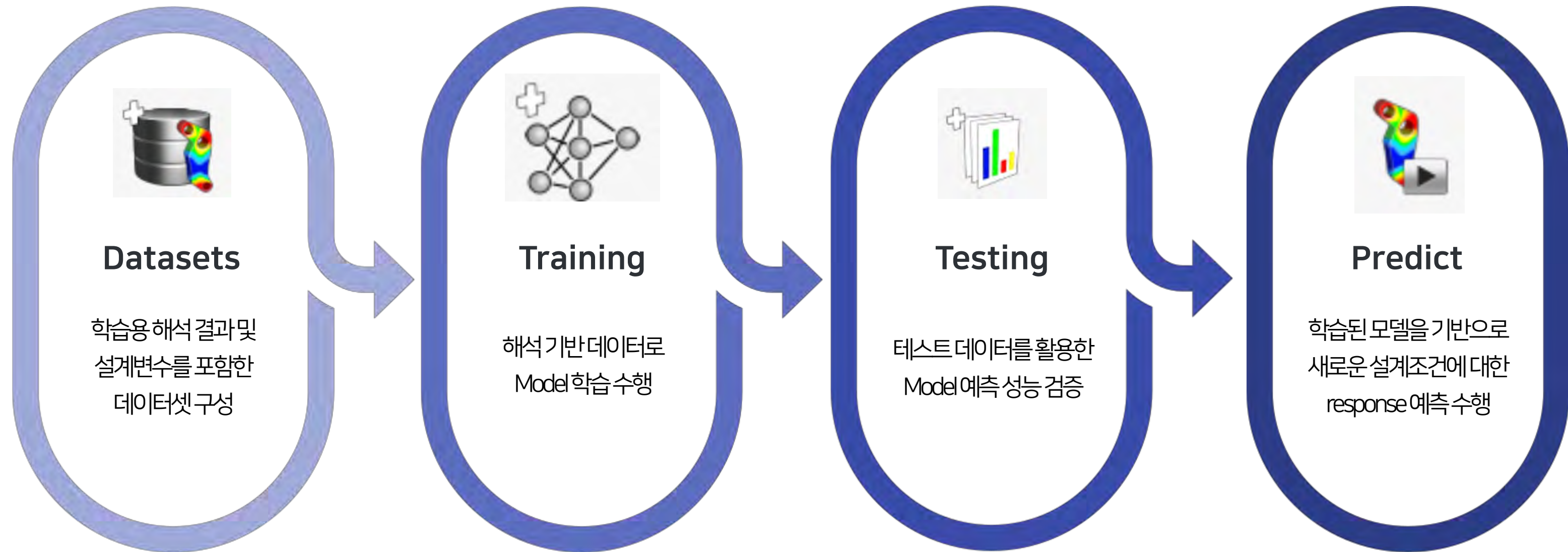


- 기존 해석 데이터를 활용해 추가 해석 없이도 새로운 모델에서의 Response 예측이 가능하게 하는 Physics Ai를 선택



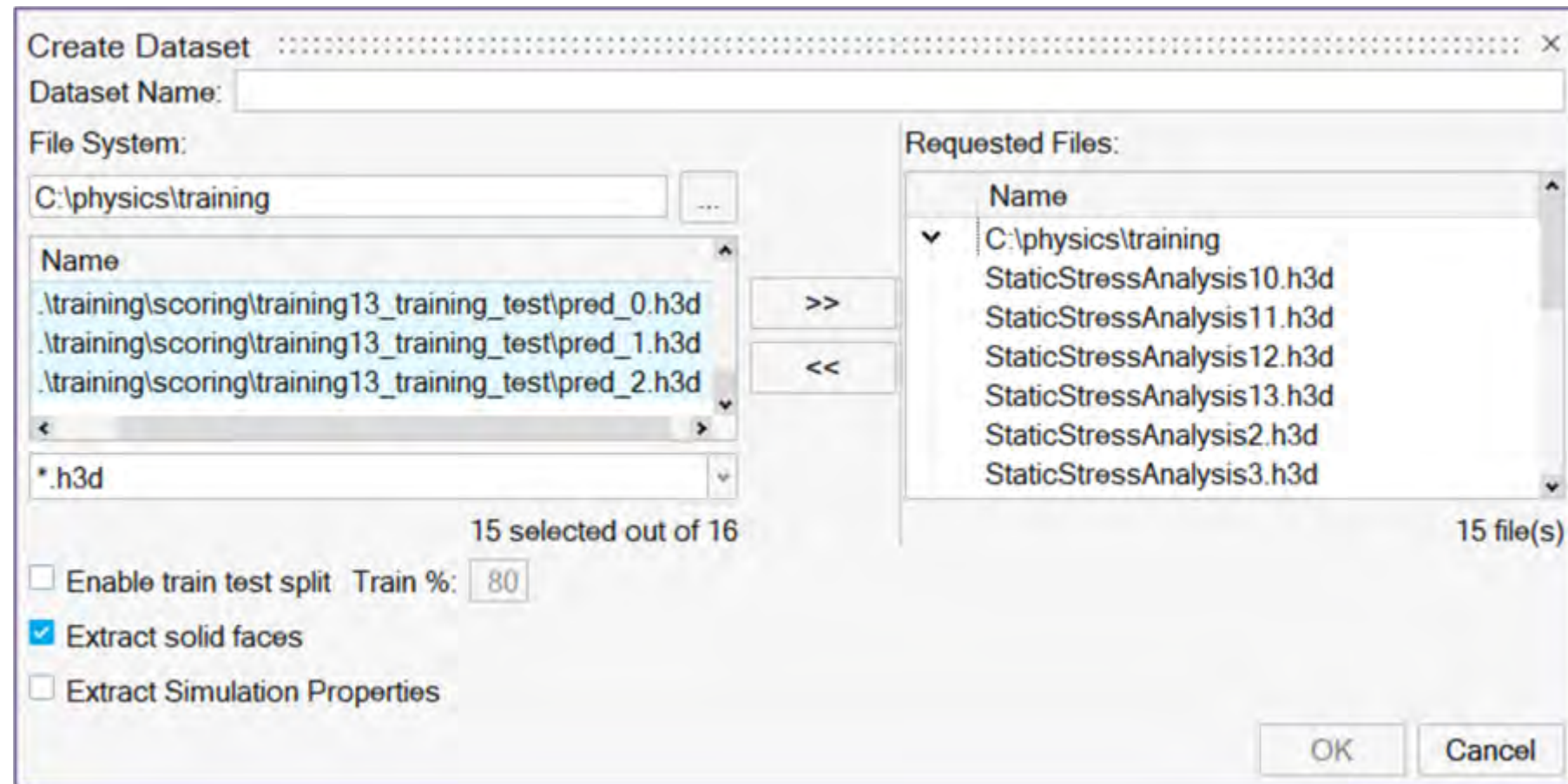
01 Outline

Predicting Response : Physics Ai WorkFlow





02 Datasets



Create Datasets

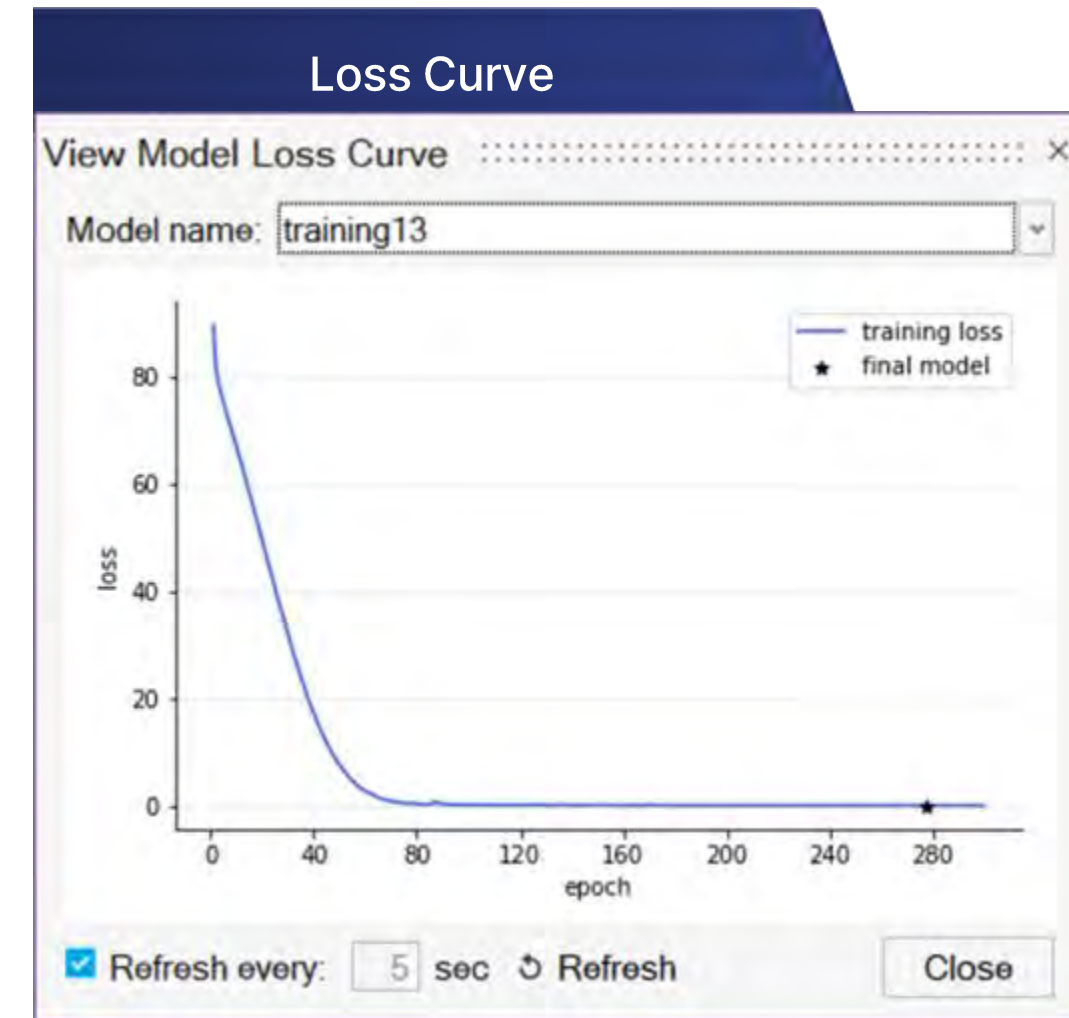
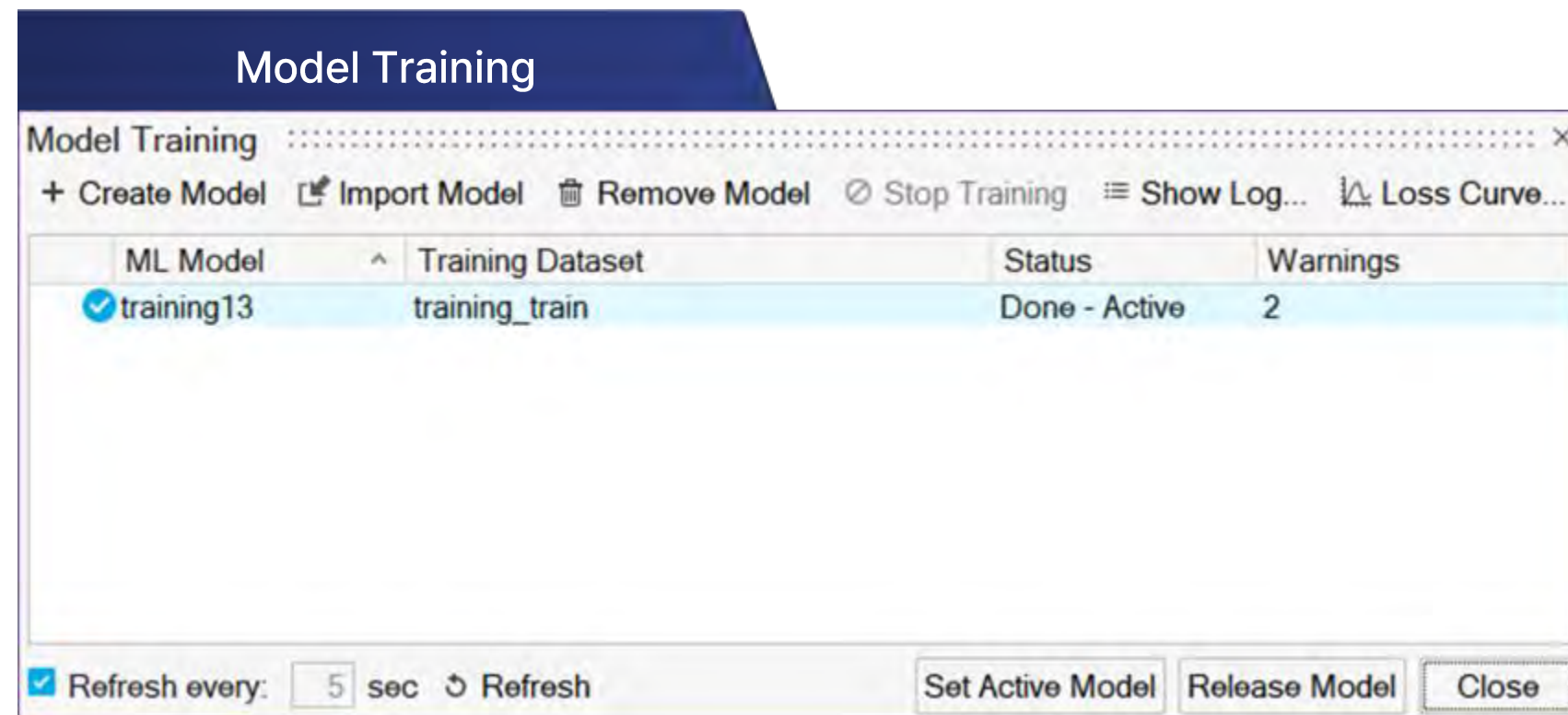
- Parametric Optimization 단계에서 생성된 해석 결과 파일(.h3d)을 기반으로 **학습용 데이터셋을 구성**
- Physics AI의 Dataset 기능을 활용하여 해석 모델의 형상, 경계 조건, 응답 값(예: 응력, 변형률 등)을 자동으로 추출하고, AI 학습에 최적화된 구조로 데이터를 구성

➤➤➤ Parametric DOE 해석 결과(.h3d)를 기반으로 Physics AI 학습용 데이터셋을 구성하였으며, Dataset 기능을 통해 주요 해석 정보를 자동 추출



03 Training

Model Training 및 Loss Curve 분석

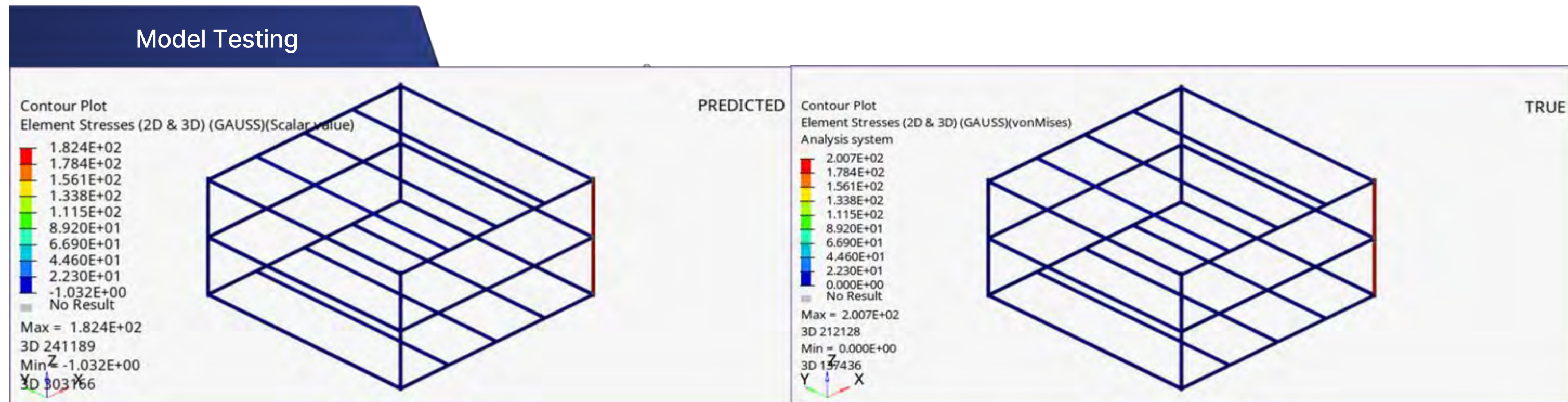


- Physics AI의 Training 기능을 활용하여 정의된 데이터셋 기반으로 머신러닝 모델 학습을 수행
- 학습 진행 중 **Loss Curve**를 통해 오차 감소 경향을 실시간으로 확인 가능하며, 학습 데이터와 모델 간의 적합성 및 수렴 특성 판단
- 모델은 총 **300 Epoch** 동안 학습을 진행, Loss Curve를 통해 학습 진행 상황을 실시간으로 확인하며, 학습 데이터와 모델 간의 정확성 및 수렴 특성을 판단



04 Testing

학습된 모델 Testing 및 신뢰성 검증

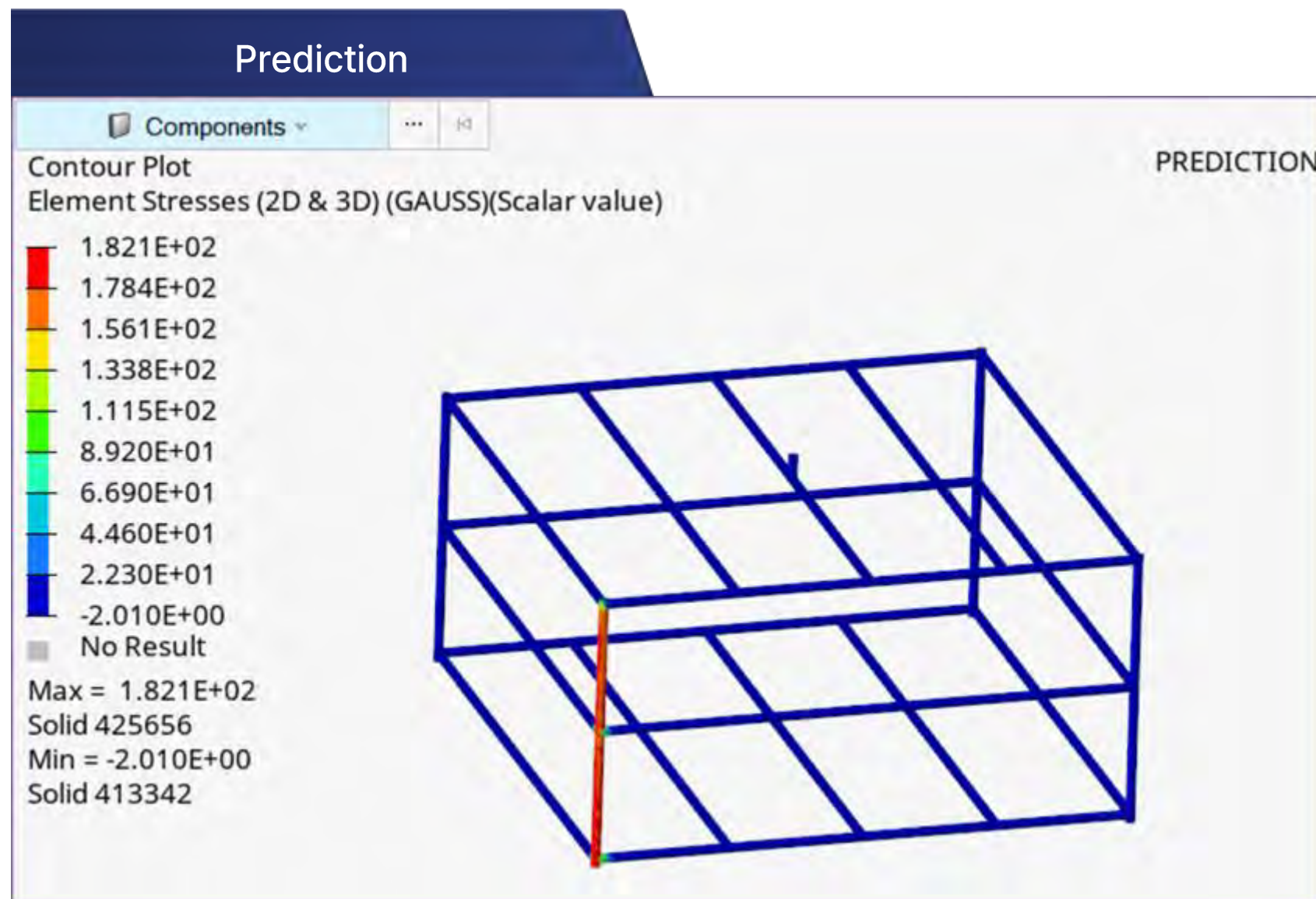


- Physics AI의 Testing 기능을 활용하여 학습된 모델의 예측 결과(PREDICTED)와 실제 유한요소 해석 결과(TRUE)를 비교
- Von Mises 응력 기준에서 예측값의 최대치는 182.4MPa, 실제값의 최대치는 200.7MPa로 약 9.1%의 오차율
- 해당 수준의 오차는 구조물의 항복여유와 안전계수 평가에 충분히 허용 가능한 수준으로 판단
- 따라서, 모델이 실제 구조 응답을 매우 유사하게 재현할 수 있는 신뢰도 있는 수준으로 학습되었음을 확인



05 Predict

새로운 모델에 대한 Response 예측



- Physics AI의 Predict 기능을 활용하여 $R = 4\text{mm}$, $T = 1\text{mm}$ 로 변경하고, 스케일을 2배 확대한 새로운 모델에 대해 Response 예측
- Von Mises 응력 기준에서 예측된 최대 응력은 182.1MPa 이며, 이는 Al6061-T6의 항복강도(300MPa) 대비 약 60.7% 수준으로, 설정한 목표 안전계수 2에는 다소 미치지 못하지만, 사용 조건에 따라 구조적 안전성 확보는 가능한 수준으로 판단

Project 1

: Grenade Case Optimization

Mode Analysis





01 Outline

드론 탑재 소화탄 케이스의 진동 응답을 예측하여 공진 가능성을 평가하고, 구조 안전성 확보를 위한 설계 검토 기반 마련

Problem

소화탄 케이스의 고유진동수와 드론 모터로 인한 외부진동수가 유사할 경우, **공진 현상** 발생으로 인해 구조물에 과도한 진동 응답이 유도될 수 있으며, 이로 인한 파단 위험이 존재

Research Develop

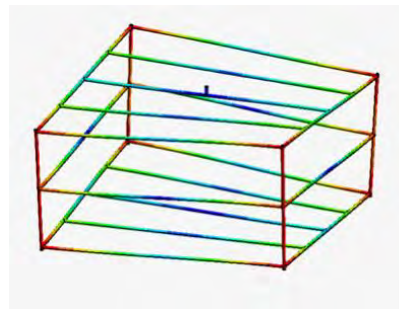
- 모드해석을 통해 **공진 발생 가능성을 분석**하고, 주파수 응답해석을 수행해 실제 발생 시 구조 안전성에 미치는 영향을 분석
- 결과에 따라 필요 시 보강 설계

»»» 완전한 설계자동화를 위해 형상 생성부터 해석 수행까지 일련의 과정을 Script 기반으로 자동화함으로써 반복 작업 없이 다양한 모델에 대한 신속한 응답 예측이 가능한 **SimLab**을 선택



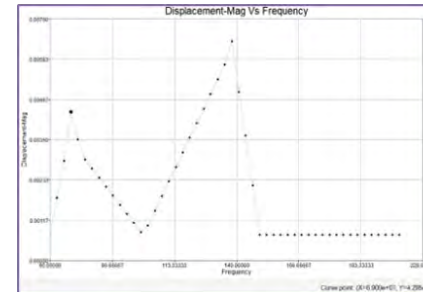
02 WorkFlow

공진으로 인한 구조 응답 증가를 방지하기 위한 Workflow



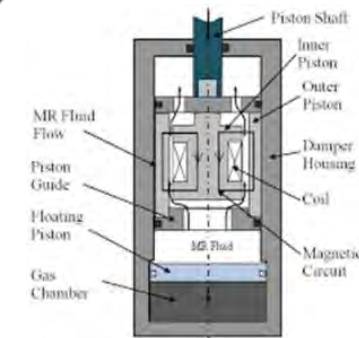
모드해석

구조물의 고유진동수 및 모드
형상을 도출하여
주파수 영역 식별



주파수 응답해석

공진 조건에서의 응력 집중
및 변위 과다 여부 확인



Damper 설계

필요시 공진저감을
위한 Damper 설계



03 Analysis

RBE : 하중 전달 조건을 해석에 반영하기 위한 RBE 생성

Create RBE

Create RBE

Name: RBE6324134

Dependent Nodes Input:

Bodies / Faces / Edges: 6509625

Body Nodes:

☒ All nodes in the body

☐ Few nodes uniformly distributed

☐ Radius limit: 0 mm

☐ Ignore mid nodes

☒ Create separate RBE for each grouping

Center Node at:

☒ Centroid

☐ Node:

☐ Arc center:

Center node ID: 59222

Connection Type:

☒ RBE2

☐ RBE3

Apply OK Cancel

RBE

여러 종속 노드를 하나의 중심 노드와 강체 연결하여 하중 분포 또는 강체 거동을 구현하기 위해 RBE 사용

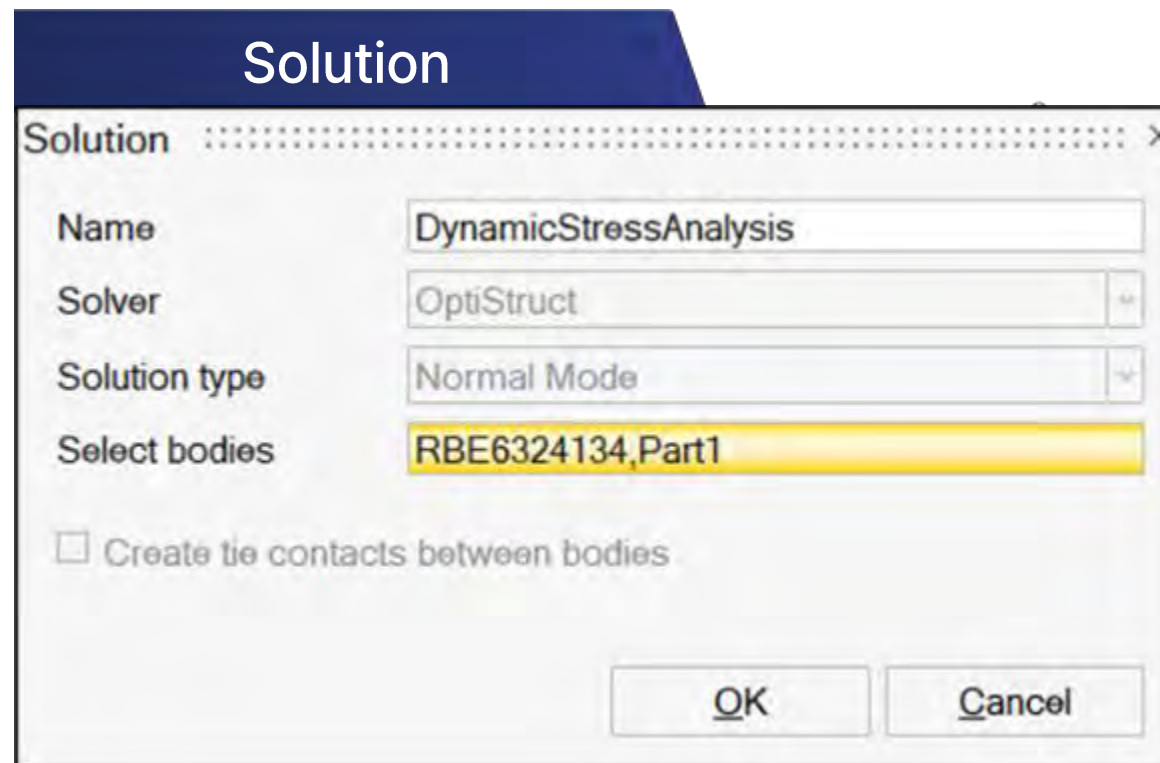
Create RBE

드론 프레임과 소화탄 케이스를 연결하는 부분에 RBE를 적용해 안정성과 물리적 타당성을 확보

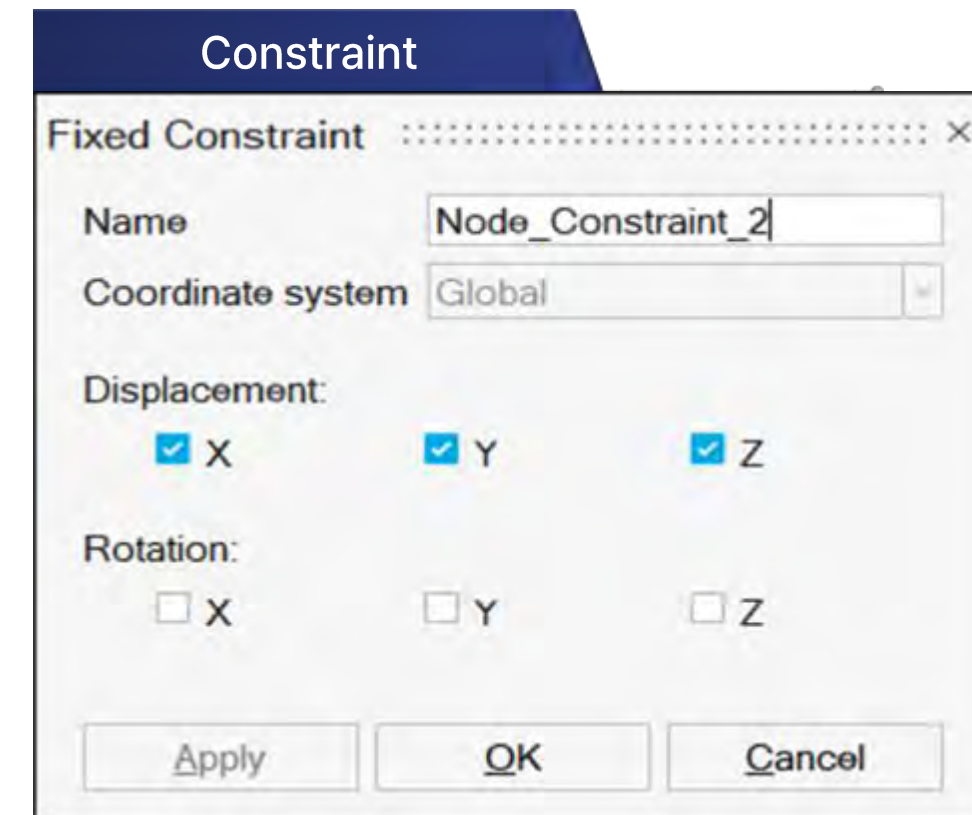


03 Analysis

Create Solution & Constraint : 신뢰성 있는 경계조건과 Solver Setting을 통한 해석 정확도 확보



구조물의 고유 진동수 및 공진 여부 확인을 위해
Optistruct Solver와 Normal Type 선택



드론과 연결되는 고정부 (RBE 중심 노드)에 XYZ 변위 구속 적용

03 Analysis

드론 모터 회전 주파수 도출 : 공진 현상 분석을 위한 드론 모터 회전 주파수 도출

정지 비행시 주파수

$$\text{총 추력 } T_a = \text{중량 } W = m \cdot g$$

$$9 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 88.29 \text{ N}$$

$$\therefore \text{모터 1개당 추력 } T = \frac{88.29 \text{ N}}{4} = 22.07 \text{ N}$$

$$T = C_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

$$(\text{추력 } T = 22.07 \text{ N}, \text{추력계수 } C_T = 0.11, \\ \text{공기 밀도 } \rho = 1.225 \text{ kg/m}^3, \text{프로펠러 직경 } D = 0.432 \text{ m})$$

$$\therefore n = 68.7 \text{ Hz}$$

전진 비행시 주파수

With interference, the front rotor power decreases by 2.55%, and the rear rotor power increases by 11.2% at a speed of 50km/h.

$$P \propto n^3, \frac{n}{n_0} = \sqrt[3]{\frac{P}{P_0}} \quad \therefore \begin{aligned} f_F &= 68.1 \text{ Hz}, \\ f_R &= 71.2 \text{ Hz} \end{aligned}$$

- 정지비행시 모터 회전 주파수는 드론 전체 중량을 4개의 프로펠러가 균등하게 지탱한다는 가정하에, 항공역학적으로 검증된 추력식을 사용해 도출
- 전진비행시 모터 회전 주파수는 DJI 사에서 구체적인 RPM 데이터를 제공하지 않아, 유사한 쿼드콥터 사례를 다룬 논문 내 실험내용을 참고해 도출
- 드론 모터 회전 주파수는 실제 구동 중 구조물에 전달되는 외부 가진 주파수로 작용할 수 있으므로, 구조물의 고유진동수와 겹칠 경우 공진 현상의 발생 가능성이 존재



03 Analysis

Solver Setting : 공진 분석을 위한 최적 주파수 설정과 해석 효율 확보

Solver Setting

Name	Card	Value
Normal Mode Extraction Parameters (EIGRL/EIGRA)		
Extraction Method	EIGRL/EIGRA	Lanczos
Number of Modes	ND	20
Min frequency	V1	10 Hz
Max frequency	V2	300 Hz
Normalization Method	NORM	Mass
Number of Vectors	MAXSET	8
Frequency of first flexible mode	SHFSCL	100 Hz
Amplification Factor	AMPFFACT	5.0
Diagnostic level	MSGVLV	Solver Default
Direct Matrix Inputs		
Stiffness Matrix(K2GG)	DMIG	
Mass Matrix(M2GG)	DMIG	
Load Matrix(P2G)	DMIG	
Solution Control Parameters(PARAM)		
Automatically Constraint stiffness singularities	AUTOSPC	Solver Default
Check Element Quality	CHECKEL	No
Mass Matrix Approach	COUPMASS	Solver Default
Effective Mass Output	EFFMASS	Solver Default
Activate Fast Contact	FASTCONT	Solver Default

Description:

OK Cancel

해석 주파수 설정

- 드론 모터의 회전 주파수(약 70Hz)와 그 고조파를 고려했을 때, 구조물과의 공진 가능성을 충분히 평가하기 위해 해석 주파수 범위를 10~300Hz로 설정
- 경량 파이프 구조물의 경우, 주요 고유진동수는 일반적으로 200Hz 이하에 집중되며, 설정한 상한 주파수(300Hz)는 대부분의 고유모드를 포함하므로 모드 개수를 20개로 지정하여 해석 효율성과 정확도를 모두 확보
- 해석의 주요 관심 영역은 연결부 응답 및 고유진동수에 있으므로 일부 요소의 품질 저하가 전체 결과에 미치는 영향은 제한적이라 판단되어, 요소 품질 검사(CHECKEL)는 비활성화하여 해석 안정성과 속도를 확보



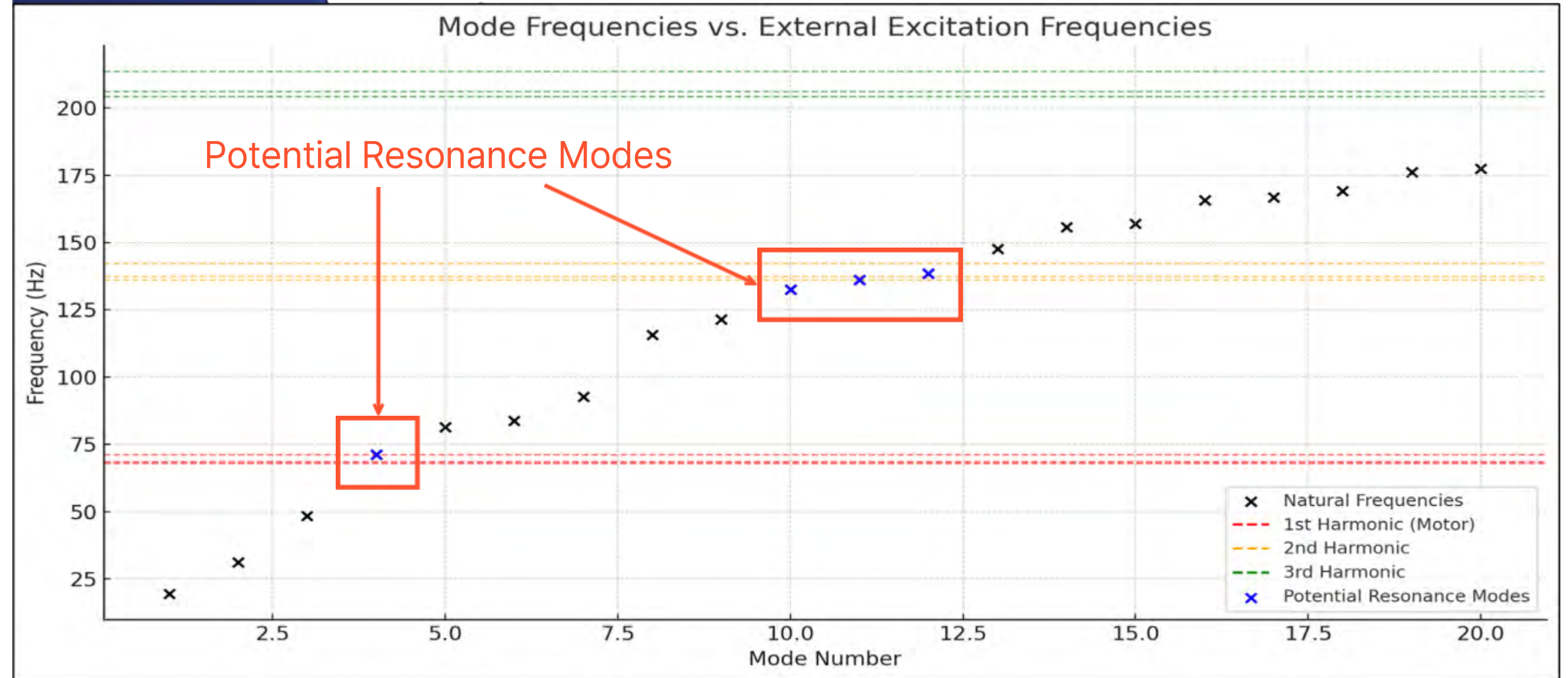
04 Response

모드 주파수

Results

Frequency_1: 19.5454 Hz	■
Frequency_2: 31.2692 Hz	■
Frequency_3: 48.3186 Hz	■
Frequency_4: 71.1885 Hz	■
Frequency_5: 81.3889 Hz	■
Frequency_6: 83.8054 Hz	■
Frequency_7: 92.8087 Hz	■
Frequency_8: 115.651 Hz	■
Frequency_9: 121.434 Hz	■
Frequency_10: 132.443 ...	■
Frequency_11: 136.177 ...	■
Frequency_12: 138.532 ...	■
Frequency_13: 147.667 ...	■
Frequency_14: 155.729 ...	■
Frequency_15: 156.91 Hz	■
Frequency_16: 165.826 ...	■
Frequency_17: 166.726 ...	■
Frequency_18: 169.152 ...	■
Frequency_19: 176.217 ...	■
Frequency_20: 177.355 ...	■

Resonance Analysis



모드해석 결과와 모터 회전 주파수 및 고조파(2f,3f)를 비교한 결과 4차,10차,11차,12차모드에서 공진 가능성이 존재하는 것으로 판단

- 》》》
- 공진 주파수와 고유진동수의 중첩 여부를 기반으로 주파수 응답 해석을 수행
 - 구조적 안정성을 정량적으로 평가하고 필요 시 Damper 등의 보완 설계를 검토

Project 1

: Grenade Case Optimization

Frequency Response Analysis





01 Outline

주파수 응답 해석을 통해 소화탄 케이스의 진동 응답을 정량적으로 분석하고, 공진이 구조 안정성에 미치는 영향을 평가하여 필요 시 보강 설계의 근거로 활용

Problem

Mode Anlysis 결과 4차, 10차, 11차, 12차 모드에서 소화탄 케이스의 고유진동수와 드론 모터 회전 주파수가 유사하게 분석되어, 공진 현상으로 인한 구조물의 과도한 진동 응답으로 파단 위험 존재

Research Develop

- 주파수 응답해석을 수행해 실제 발생 시 구조 안전성에 미치는 영향을 분석
- 결과에 따라 필요 시 보강 설계

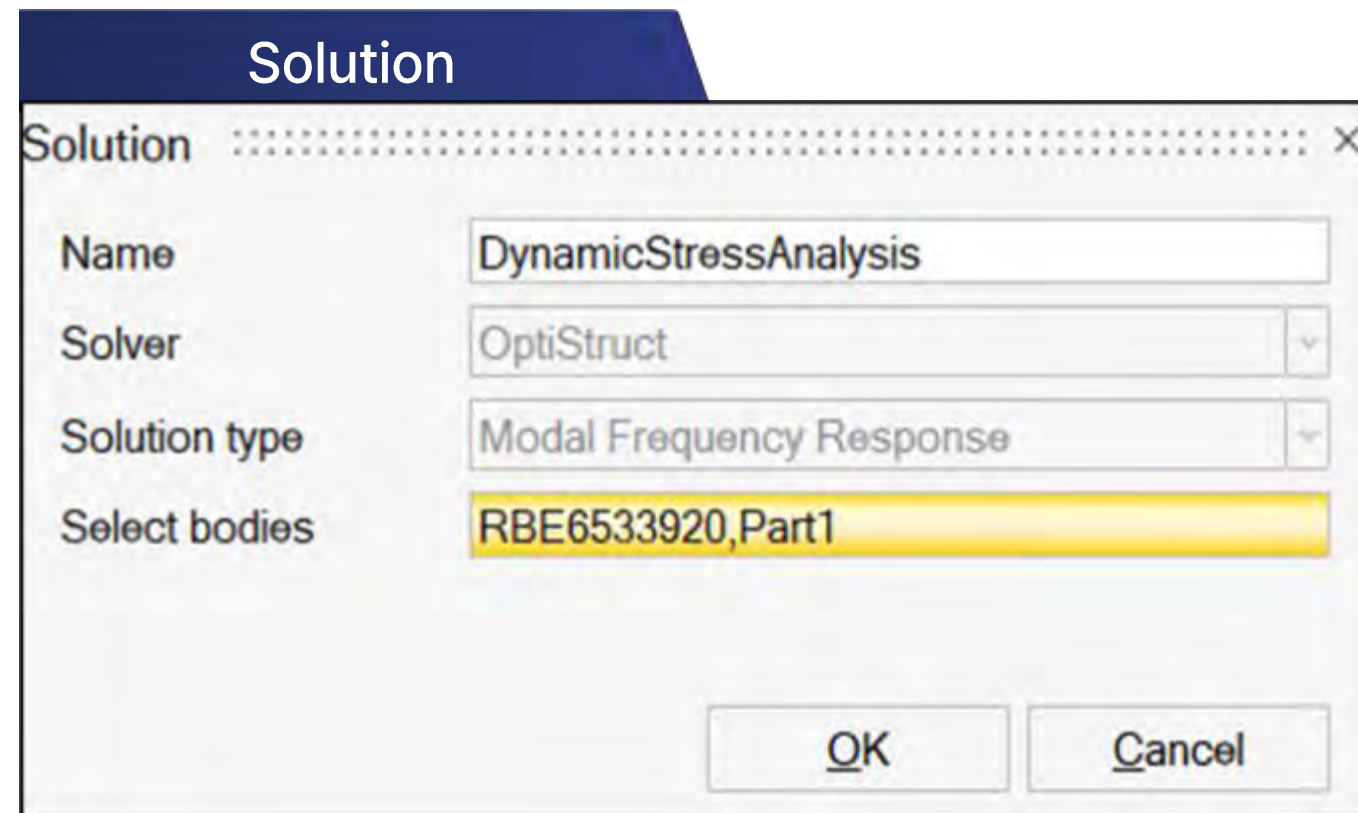


완전한 설계자동화를 위해 형상 생성부터 해석 수행까지 일련의 과정을 Script 기반으로 자동화함으로써 반복 작업 없이 다양한 모델에 대한 신속한 응답 예측이 가능한 SimLab을 선택

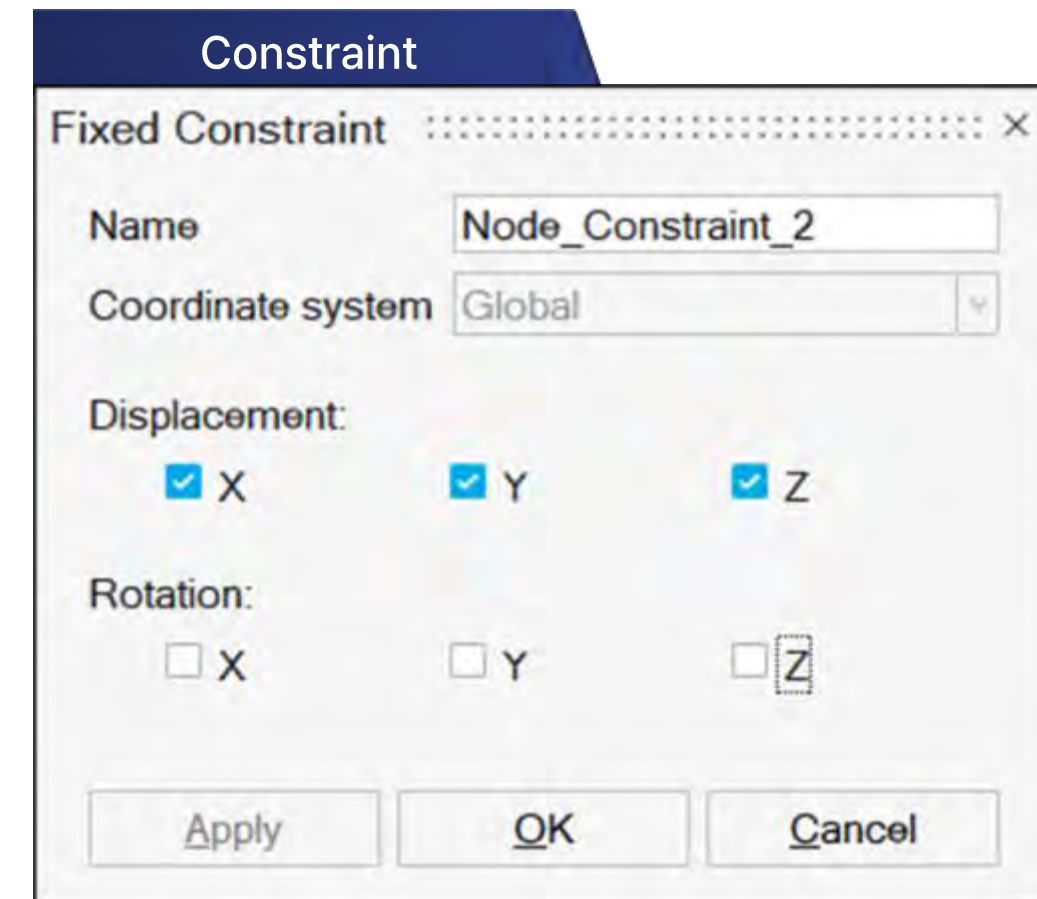


02 Analysis

Create Solution & Constraint : 해석을 위한 Solution 생성 및 신뢰성 있는 경계조건 설정을 통한 해석 정확도 확보



주파수 응답해석을 통한 공진 시 구조 안정성 판단을
위해 OptiStruct Solver와 Modal Frequency
Response Type 선택



드론과 연결되는 고정부(RBE 중심 노드)에 XYZ 변위 구속 적용



02 Analysis

Force : 진동 환경을 고려한 보수적 하중 산정으로 주파수 응답해석의 신뢰성 확보

Create RBE

Force and Moment

Name: Force_4

Coordinate system: Global

Force:

☒ Total

X: 0 N Y: 0 N Z: 618 N

Distribute over nodes on face / edge:

☒ Use shape function

☐ Divide equally on all nodes

☐ Node force on each node

☐ As a function of XYZ

None Create

Moment:

X: 0 N*mm Y: 0 N*mm Z: 0 N*mm

Apply OK Cancel

Force 도출

Acceleration Levels : Typically between 0.2g and 10g for avionics, but higher for structural components.

$$F = m \cdot a = 6.3 \text{ kg} \cdot 10 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 = 618.03 \text{ N}$$

(m : 프레임, 배터리 등 구조물 위쪽에 있는 진동 전달원들의 총 질량,
 a : DO - 160에서 규정하는 항공전자장비 시험 규격을 참고해 10g로 설정)

- 드론 상부 구조(6.3kg)에 대해, 고속 회전 및 공진 가능성까지 고려한 보수적 기준으로 진동 가속도 10g(98.1 m/s²)을 적용하여 Z방향으로 618N의 가진력을 산정함
- 해당 가속도 수준은 항공전자장비 진동시험 규격(DO-160)에서 제시하는 범위 내에서 가장 보수적인 값으로 드론에 적용하기 위한 규격은 아니지만, 드론 탑재 장비 및 페이로드 설계에서 제조사들이 참조 기준으로 활용



02 Analysis

Excitation Load : 공진 위험성이 높은 대역을 반영한 하중 테이블 작성 및 가진력 정의

Excitation Load

Excitation Load

Name: ExcitationLoad_5

Amplitude table: FldTable2 Modify

Phase table: None Create

Excitation type: Applied load

Excitation load type: Force

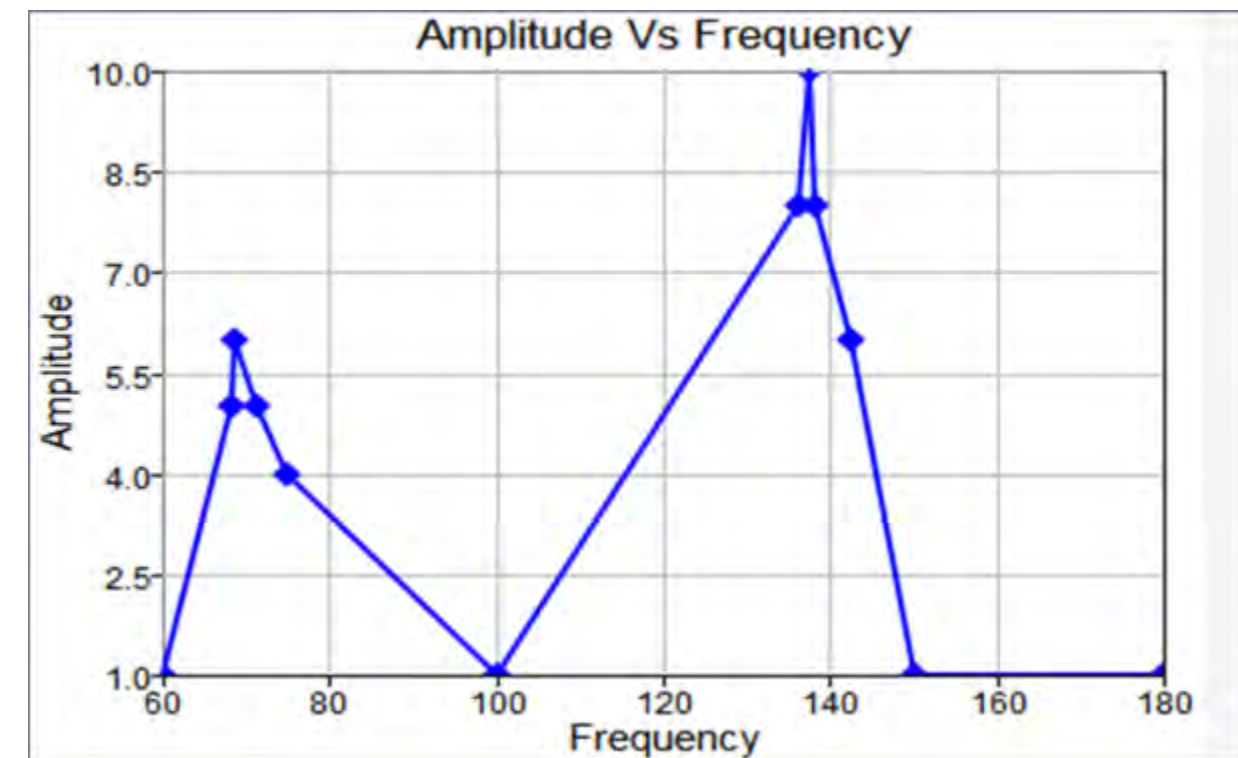
Excitation load: Force_4

Scale Factors :

☐ DX ☐ DY ☐ DZ

☐ RX ☐ RY ☐ RZ

Apply OK Cancel

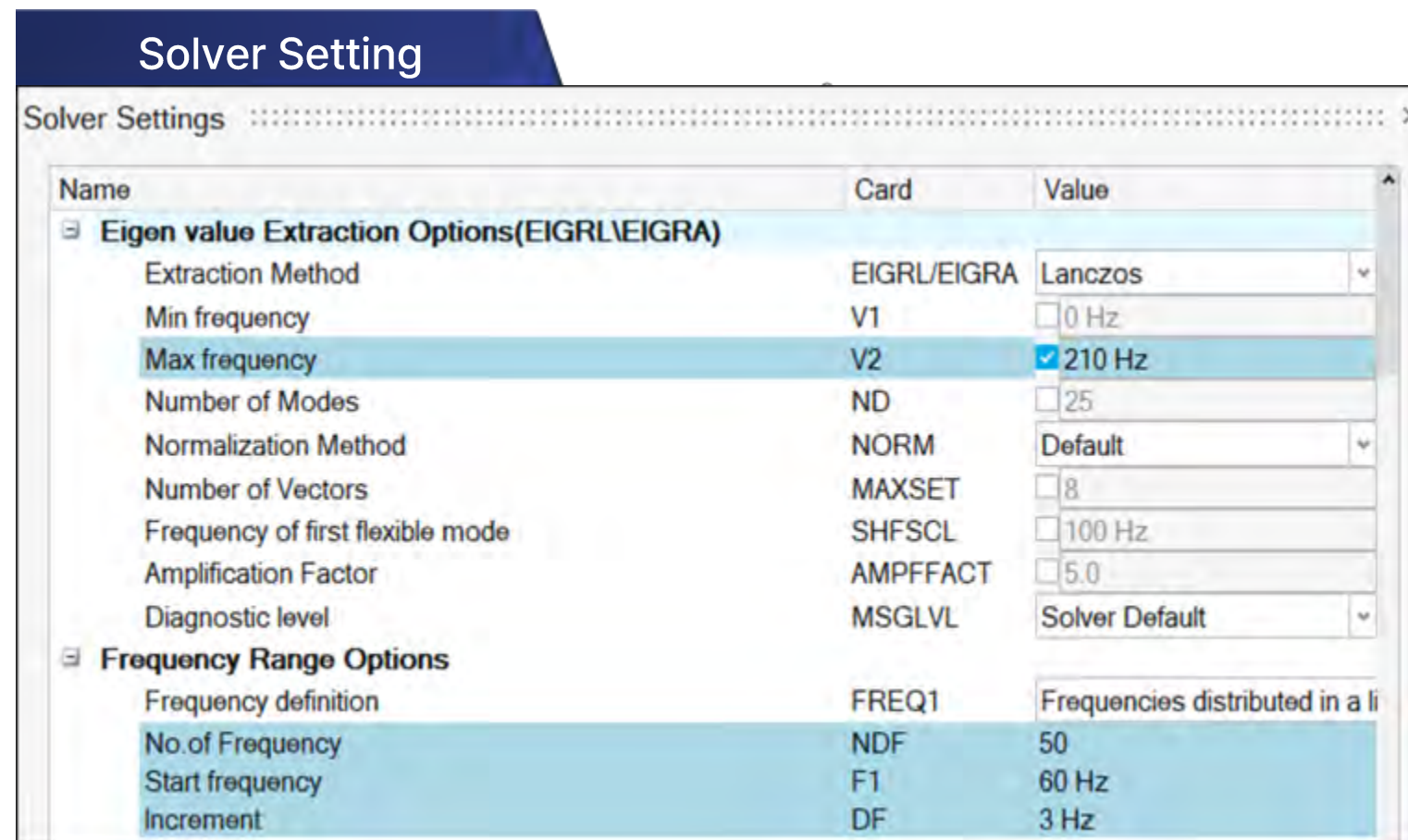


Frequency - Amplitude Table은 드론 모터 회전 주파수와 모드해석을 통해 도출된 공진 위험성이 높은 대역에 실질적인 하중 영향이 반영되도록 설계



02 Analysis

Solver Setting : 구조물의 공진 가능성 및 응답 특성 분석의 정밀도를 확보하기 위한 주파수 범위 설정

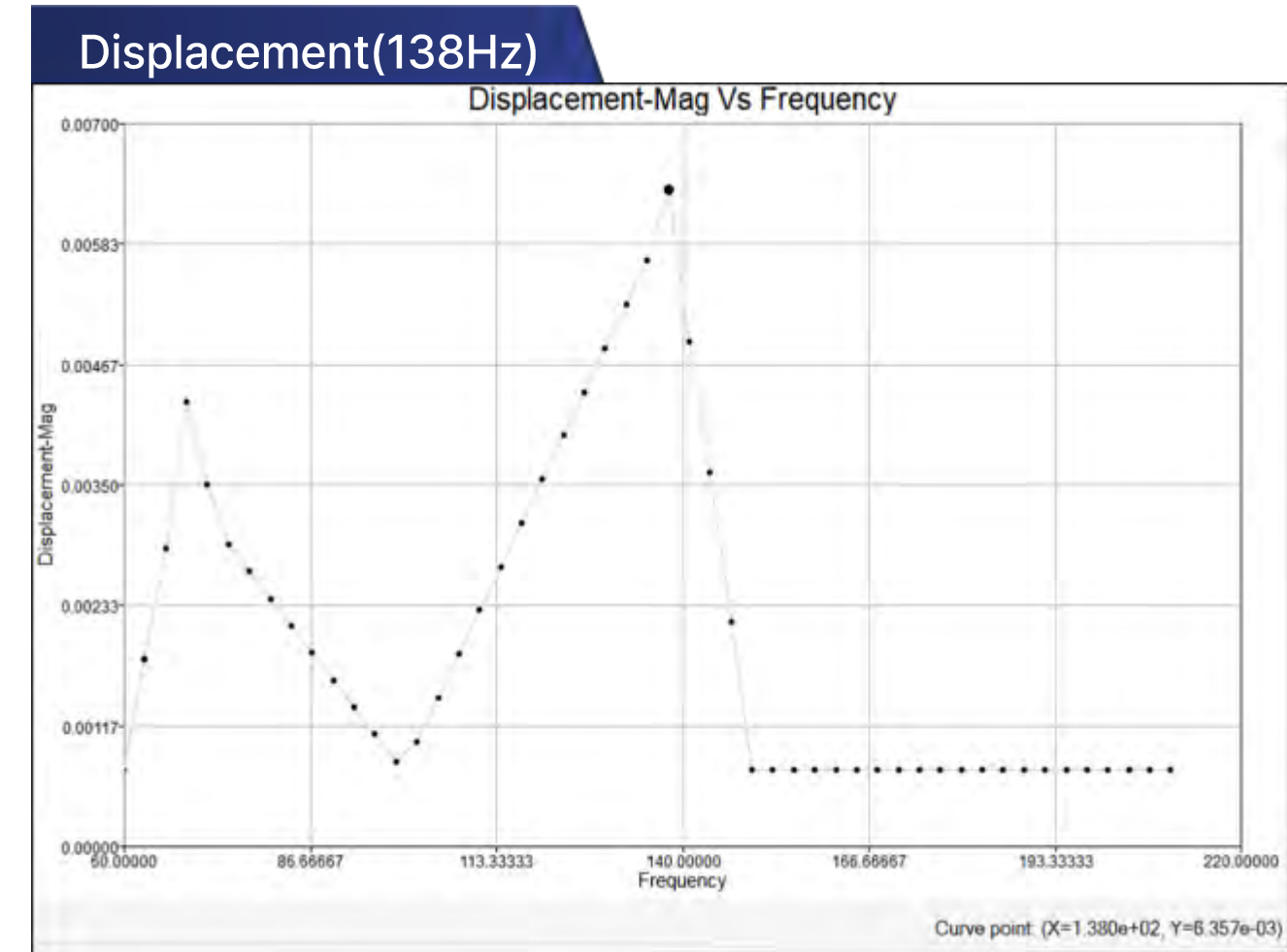
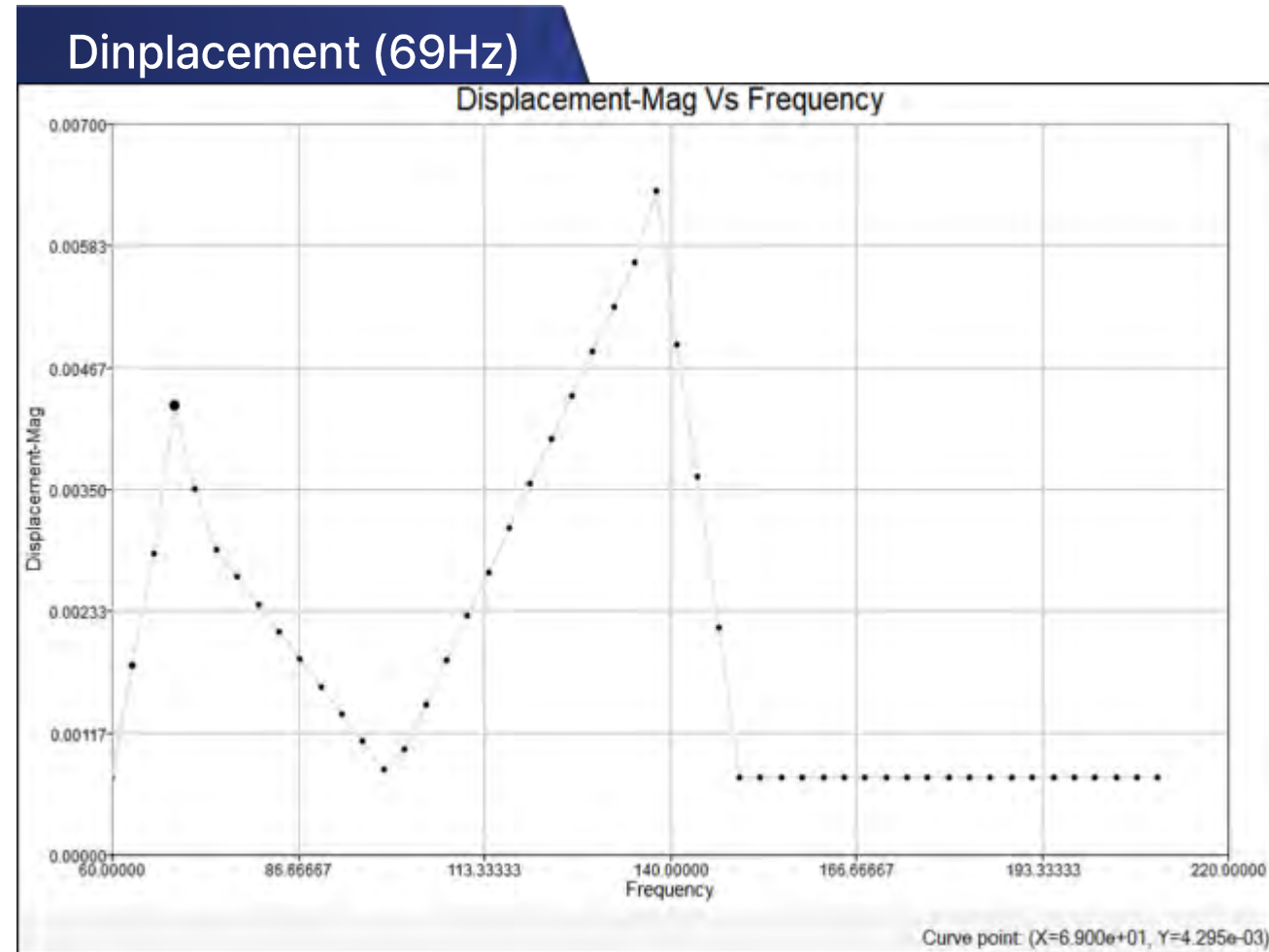


해석 주파수 설정

- 해석 주파수 상한은 구조물 공진 가능성을 충분히 포착할 수 있도록 210Hz로 설정
- 주파수 응답 범위를 60Hz부터 3Hz 간격으로 설정해 정확한 고유진동수와 응답특성 간의 상관관계 분석 기반 확보



03 Response



➤➤➤ 공진주파수(69Hz, 138Hz)에서의 최대 변위가 각각 0.004295mm, 0.006357mm로 나타나 구조물의 변형이 미미하므로, 구조 안전성이 확보되었으며 별도의 damper 설계는 불필요하다고 판단

04 Overall Result

Parametric Modeling & 비선형 정적해석 결과

- CATIA의 Parametric Design을 SimLab과 연동하여, 설계 변수 조절이 가능한 형상 기반 자동화 환경을 구성
- 해당 형상에 대해 hard one-point landing 조건을 가정한 비선형 정적 해석을 수행한 결과, 초기 설계 기준 약 0.956kg의 질량, FOS 4.77로 과설계 상태임을 확인

- 구조적 신뢰성은 확보되었으나, 경량화를 위한 개선이 필요

Parametric Optimization

- 설계변수(R, T)를 설정하여 Box-Behnken 방식의 DOE 수행
- Fit 모델의 결정계수(R^2): 1.00(Mass), 0.99(Max_Stress)로 높은 예측 정확도 확보
- 최적화에서는 중복 정보인 Max_Displacement를 제거하고, Mass 최소화 & Max_Stress $\leq 150\text{MPa}$ (FOS 2 적용)을 기준으로 GRSM(Global Response Surface Method) 기반 최적조건 도출
- 결과적으로 질량을 0.43kg으로 경량화함과 동시에 구조 안정성 확보

04 Overall Result

Physics Ai 활용 응답 예측

- Parametric Optimization 과정에서 생성된 .h3d 결과파일 기반으로 AI 학습용 Dataset 구성
- Physics AI의 Training → Testing → Predict 기능을 통해 새로운 형상(R=4mm, T=1mm)에 대한 Von Mises 응력 예측 수행: 예측값 182.1MPa, 실제 해석값 200.7MPa로 약 9.1%의 오차율 확인
- 기계학습 기반 예측이 구조 안정성 판단을 위한 항복강도 예측 수단으로 활용 가능함을 검증

모드해석

- 드론 모터 회전 주파수(정지비행 및 전진비행 조건 모두)를 기반으로 모드해석 결과로 도출된 고유진동수와 비교한 결과, 4차, 10차, 11차, 12차 모드에서 공진 가능성 존재
- 특히 고조파(2f, 3f)까지 포함할 경우 다중 공진 대역에 주의 필요



04 Overall Result

주파수 응답 해석

- 공진 가능성이 높은 대역 주파수에 대해 가진력 정의 및 Frequency-Amplitude Table 작성 후, FRA(Frequency Response Analysis) 수행
- 해석 결과, 공진점(69Hz, 138Hz)에서의 최대 변위는 각각 0.004295mm, 0.006357mm로 구조 안정성이 확보된 것을 확인, 따라서 추가적인 감쇠재 설계는 불필요한 수준으로 판단

Project 2

: Battery Case Optimize

Aerodynamic Analysis

Thickness Optimize

Safety Rate Analysis

Project 2

: Battery Case Optimize

Aerodynamic Analysis



01 Outline

Goal



일반 드론의 소방용 최적화

화재 현장 온도

화재 현장에서 드론이 소화탄을 떨어트리는 위치의 온도에 대한 배터리 케이스 최적화

소방용 드론 배터리

소화탄으로 추가되는 무게를 감안하여 드론의 최대 중량 9kg에 맞춘 케이스 최적화

배터리 온도

배터리 발열량에 맞춰 순항 시 냉각시스템이 갖춰질 수 있도록 케이스 최적화

01 Outline

Tool Selection



Research Objective 배터리 케이스에 타공되는 면을 변수로 잡아 화재 현장의 높은 온도에도 배터리가 냉각될 수 있는 케이스 제작이 목표

Tool Selection

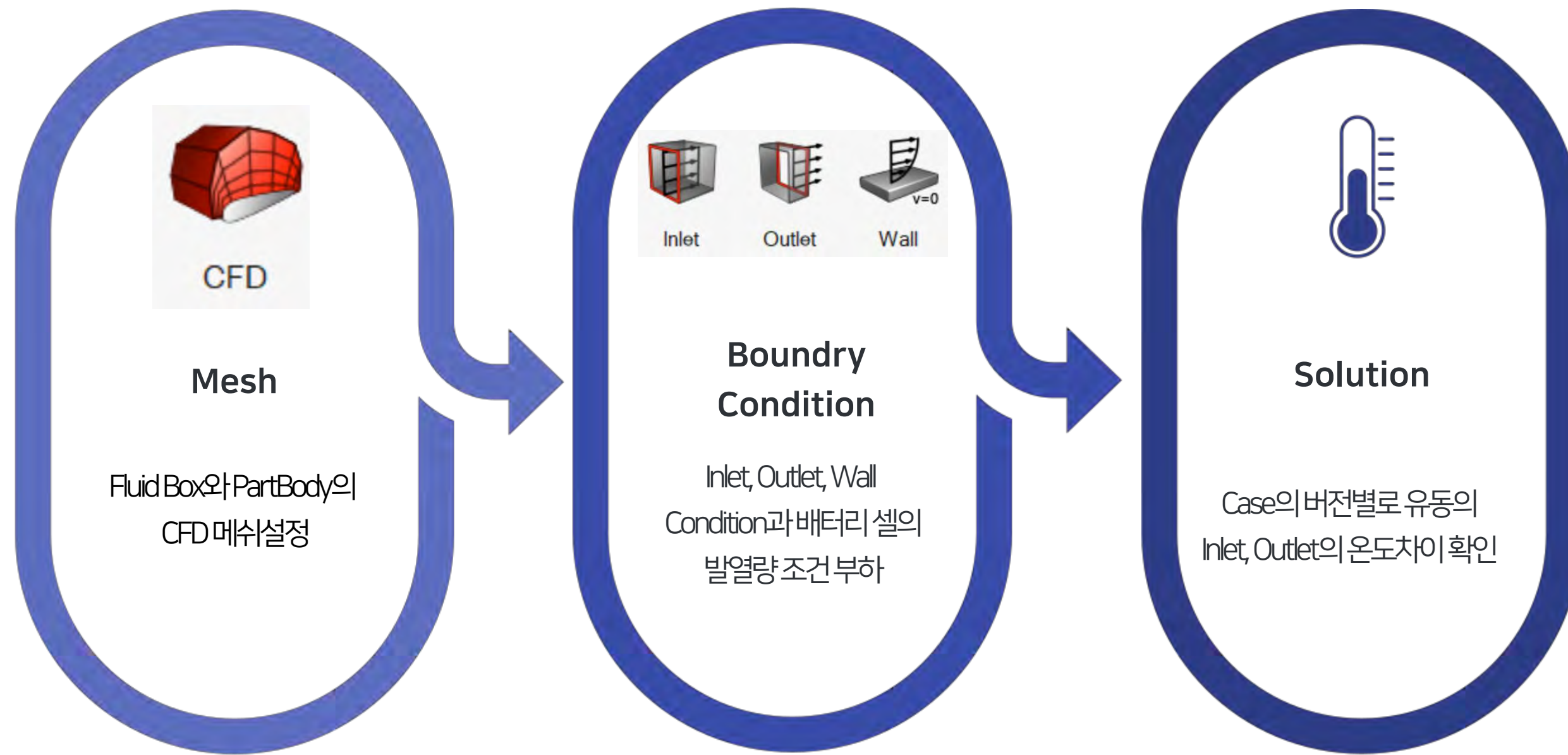
유동(Fluid)과 고체(Solid) 도메인을 동시에 포함하는 혼합 메시 자동 생성 기능 보유
Inlet/Outlet 유동 조건, 배터리 발열량(W), 벽면 열유속(heat flux) 조건 이용 가능





01 Outline

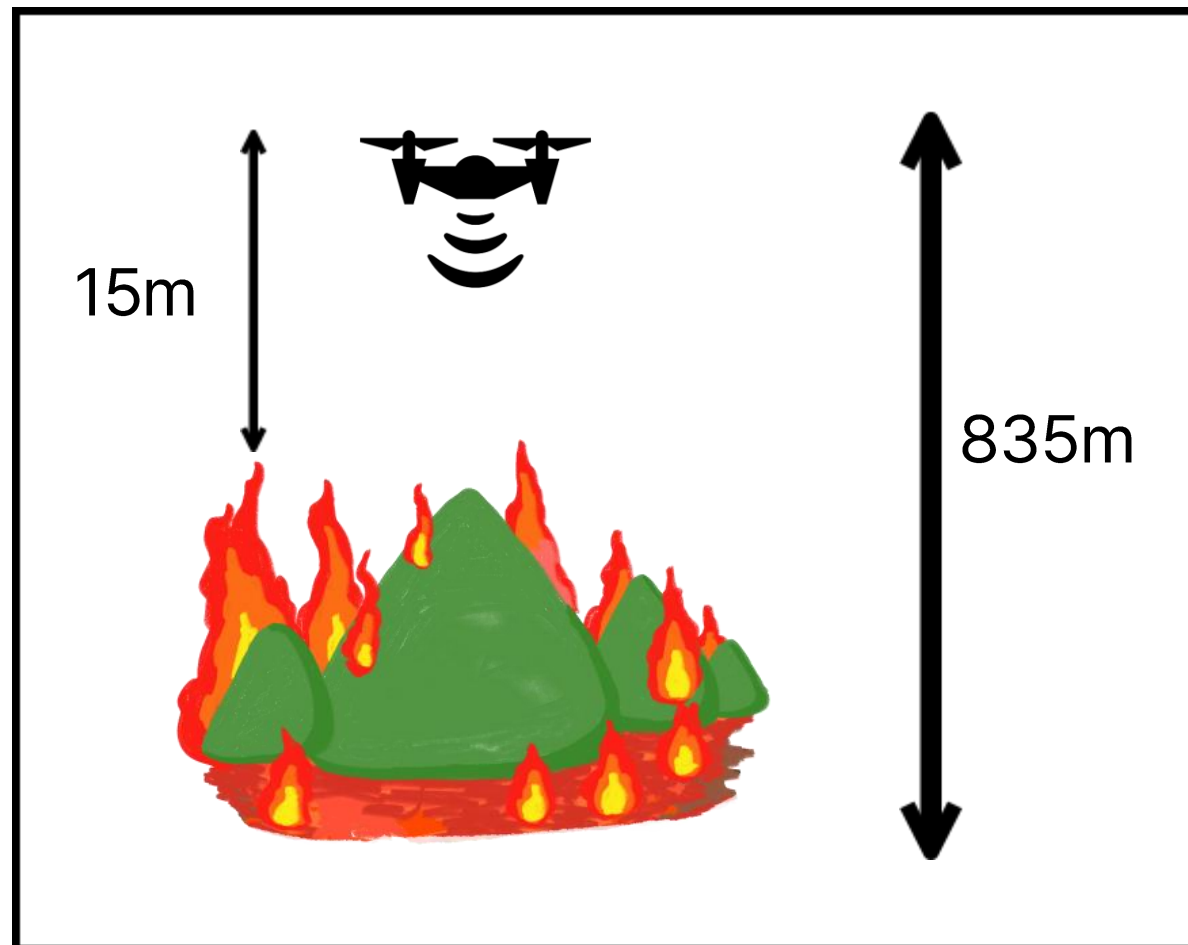
Simlab WorkFlow



01 Outline

이상기체 방정식을 활용해 화재 현장 15m 상공에서의 대기압 & 밀도 정의

→ Flow Assumption : Steady Incompressible Flow Ideal Gas



$$dF = gdm = g\rho dV = -\rho g A dy, dP = \frac{dF}{A} = -\rho g dy$$
$$PV = nRT = \left(\frac{w}{M}\right)RT \rightarrow \rho = \frac{w}{V} = \frac{M \cdot P}{R \cdot T} = \left(\frac{M}{RT}\right)P, w \text{는 기체의 총 질량}$$

$$dP = -\rho g dy = -\frac{Mg}{RT} P dy, R = N_A k_B, M = N_A m, m \text{은 분자량}$$

$$\int_{P_0}^{P(y)} \frac{dP}{P} = \int_0^y \left(-\frac{Mg}{RT}\right) dy \rightarrow \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\left(\frac{Mg}{RT}\right)y \rightarrow \therefore P = P_0 e^{-\frac{Mg}{RT}y}$$

$$\rho = \frac{P}{R_{specific} \cdot T} = 0.780 \text{ kg/m}^3$$

화재 15m 상공 -> 150°C

Aerodynamic Analysis

01 Outline

정의한 밀고, 점성 기반으로 물성치 작성

Create Material

Name: Air_aoc
Material ID: 1
Category: Fluid
Class: Fluid
Model: Basic

Name	Value	Table
Type	Constant	none
Density	0.78 kg/m3	none
Isobaric Compressibility	0.0	none
Specific Heat	1005 J/(kg*C)	none
Latent Heat Effect	None	none
Viscosity	Constant	none
Viscosity	2.5e-05 N*s/m2	none
Conductivity	Constant	none
Conductivity	0.02521 W/(m*C)	none
Radiation	False	none

Apply OK Cancel

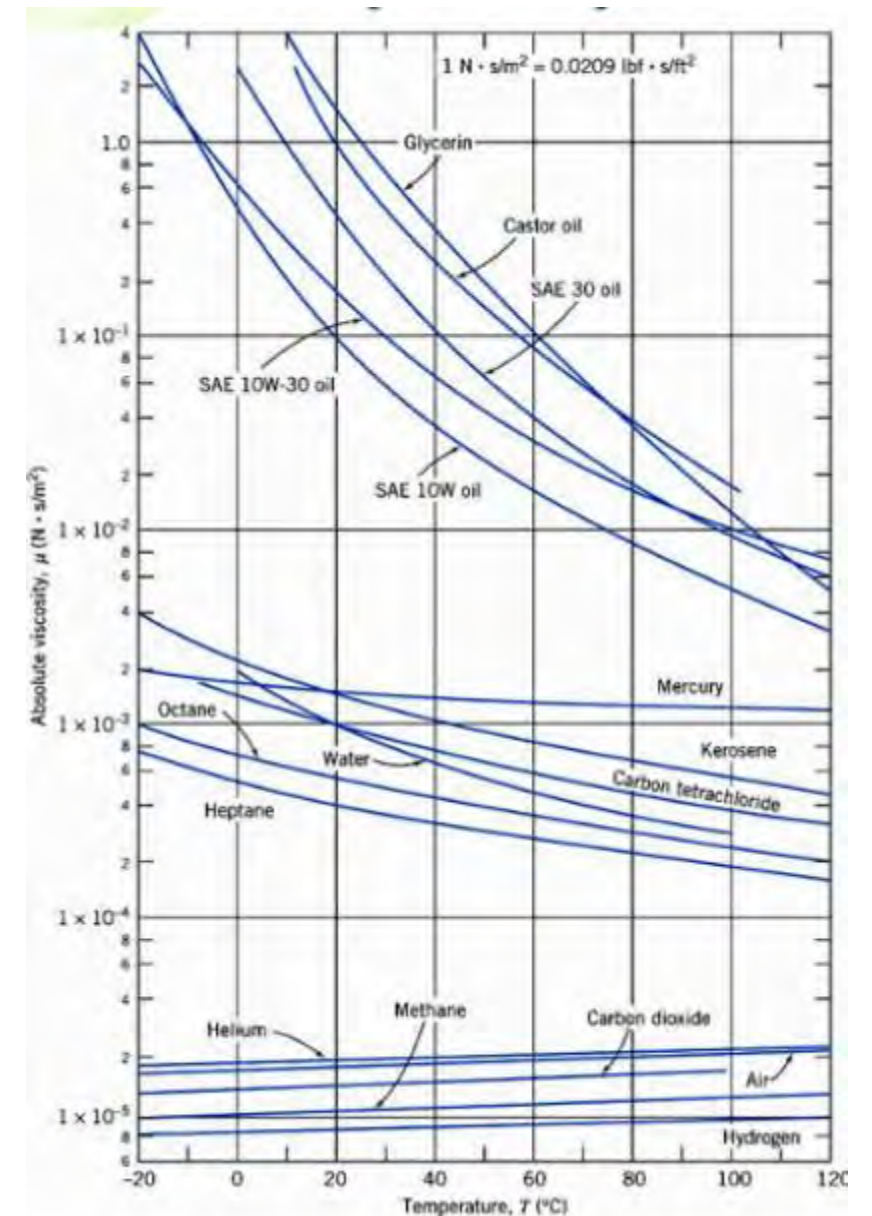
$$\rho = \frac{P}{R_{specific} \cdot T} = 0.780 \text{ kg/m}^3$$

점성계수 : 추세선으로 외삽법 이용

$$100^{\circ}\text{C} \rightarrow 2.2 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

$$120^{\circ}\text{C} \rightarrow 2.3 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

$$\therefore 150^{\circ}\text{C} \rightarrow 2.5 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$$

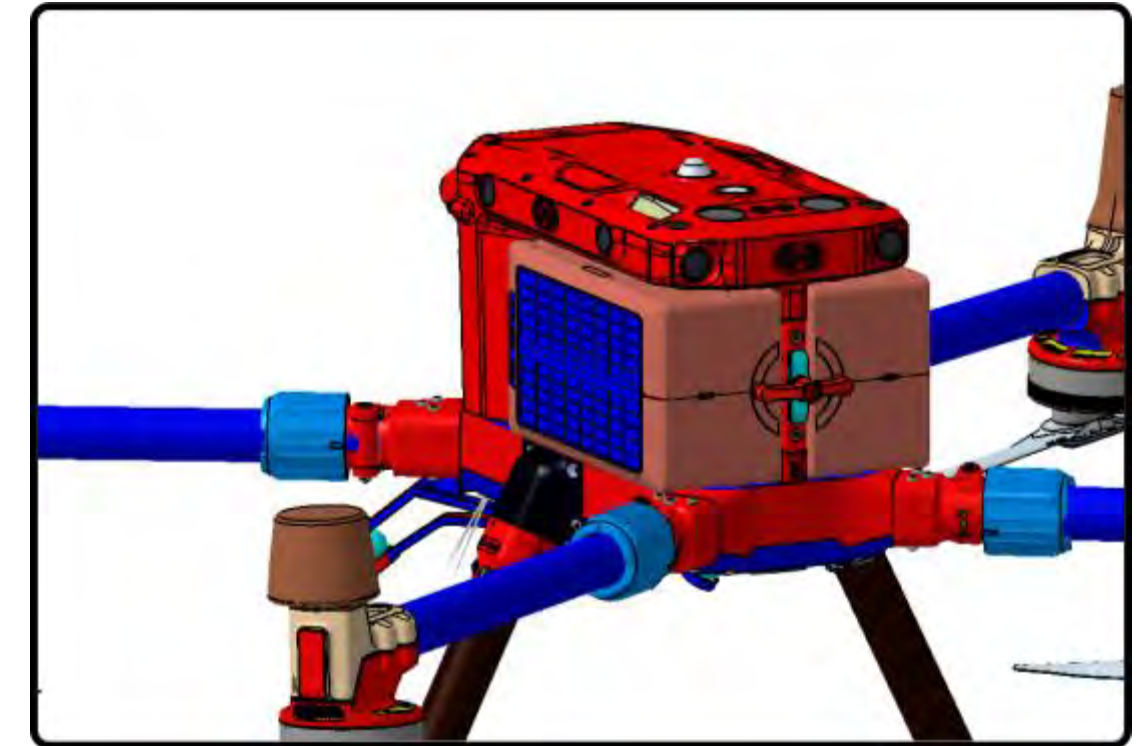
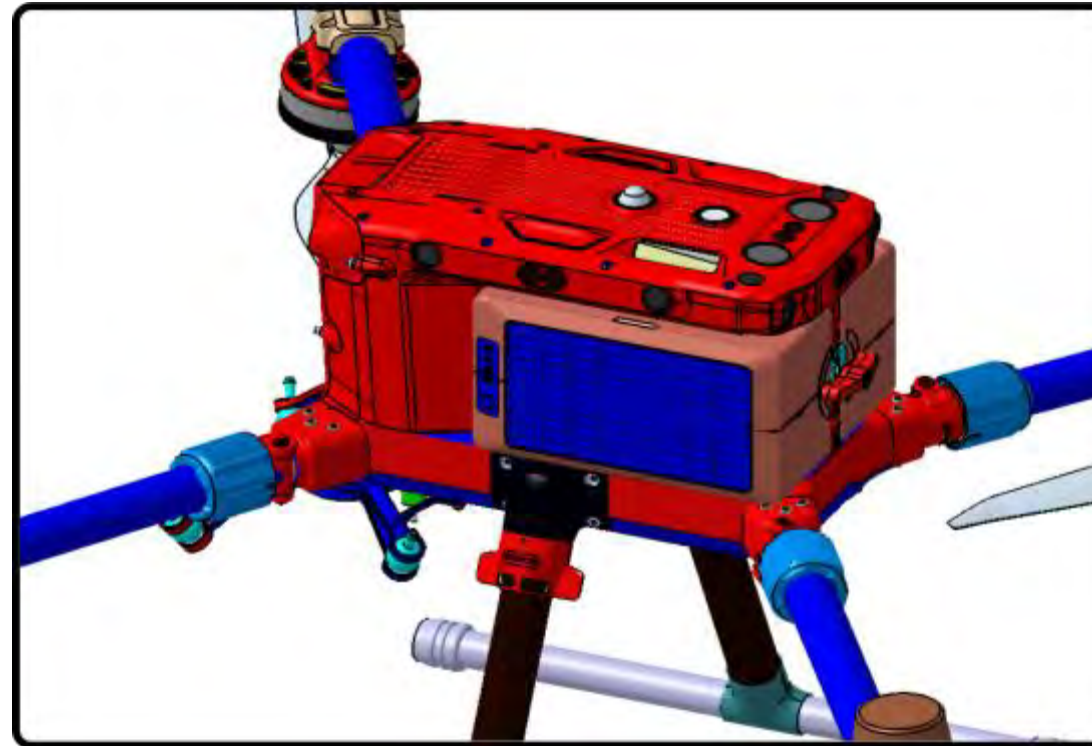


02 Modeling

Flight Condition

Cruising Altitude : 835m

Cruise Speed : 82.1 km/h = 23m/s



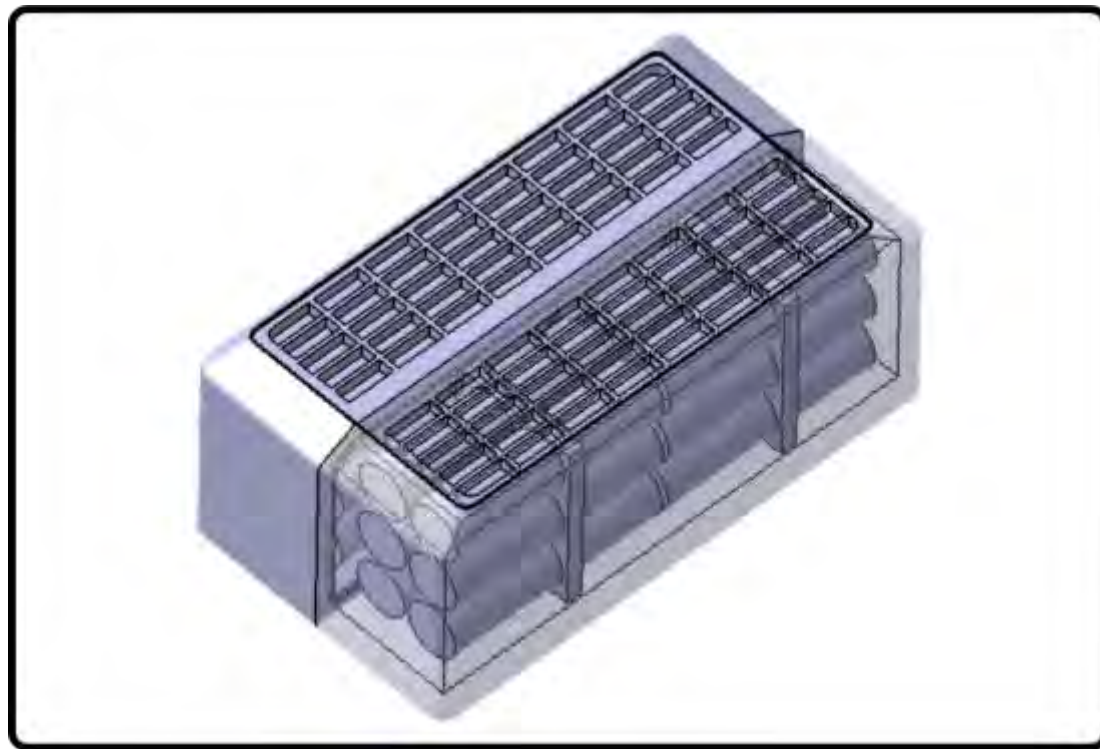
DJI Matrice 300 RTK 드론 모델의 **DJI TB60 인텔리전트 플라이트 배터리** 를 기본 모델로하여 드론 배터리 케이스의 최적화 진행

듀얼 배터리 방식: Matrice 300은 TB60 2개를 동시에 장착하여 작동함
→ 배터리 1개 고장 시에도 나머지 1개로 안전하게 착륙 가능

핫 스왑(HOT SWAP) 가능: 드론 전원 꺼지지 않고 배터리 교체 가능
→ 장시간 연속 작업 가능

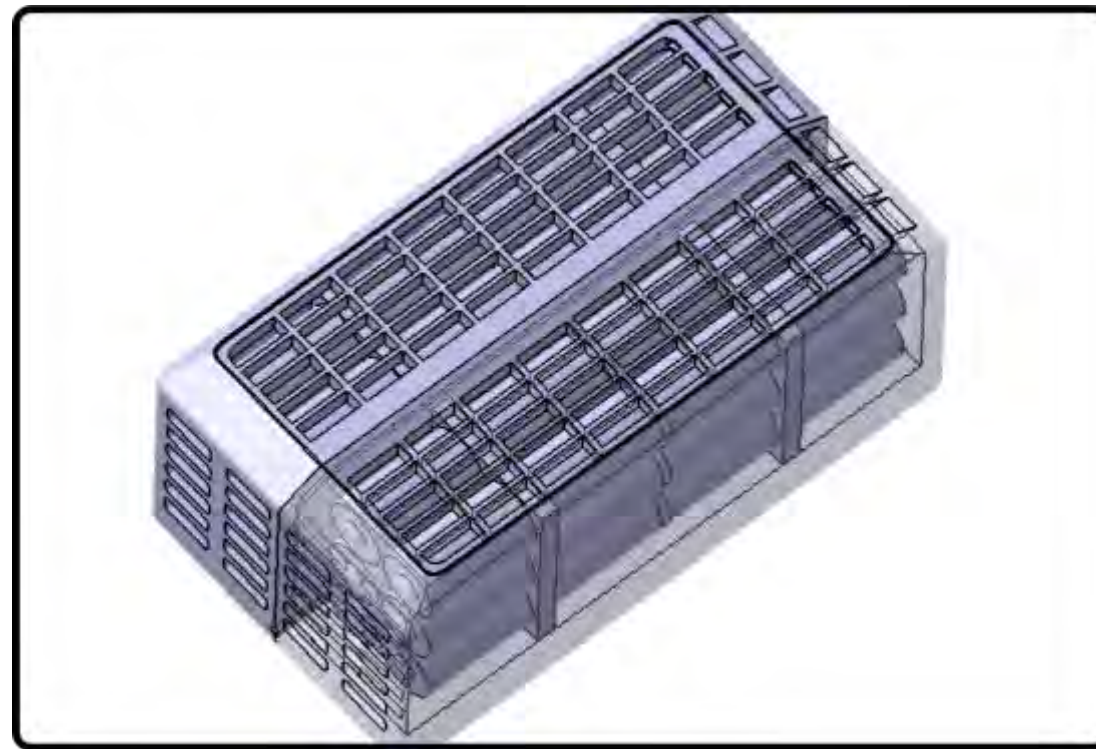
02 Modeling

배터리 케이스 기본 모델링



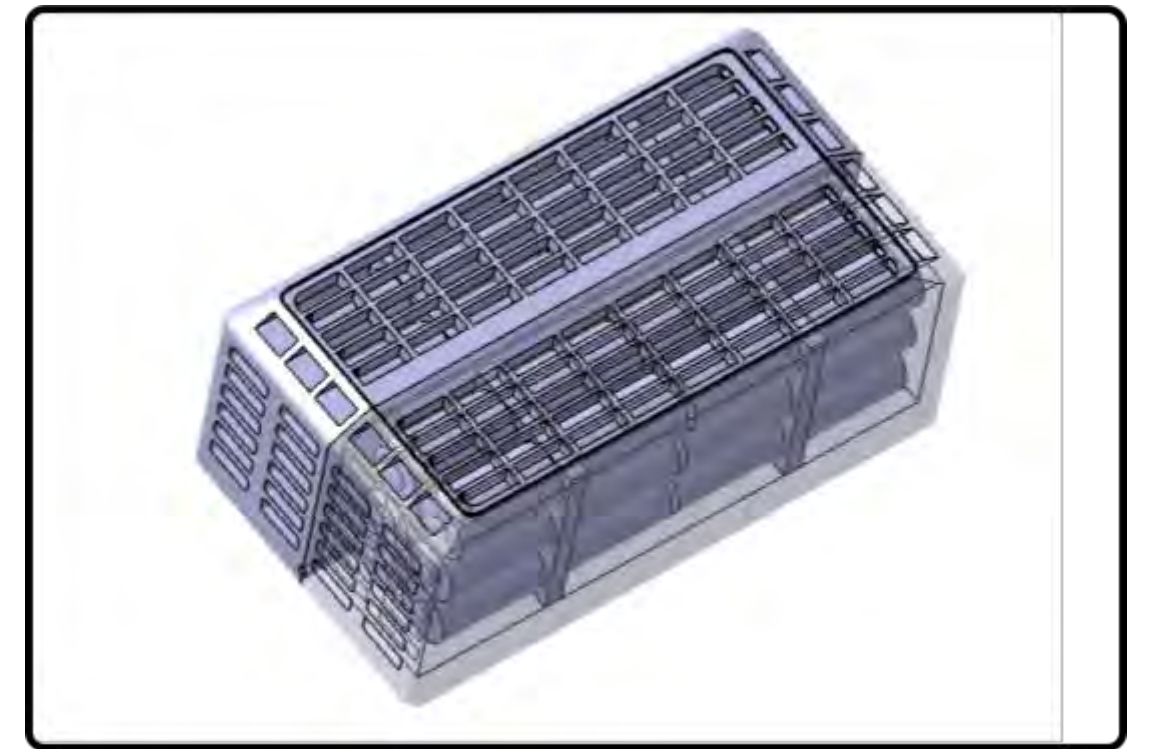
Ver1.

Basic Model



Ver2.

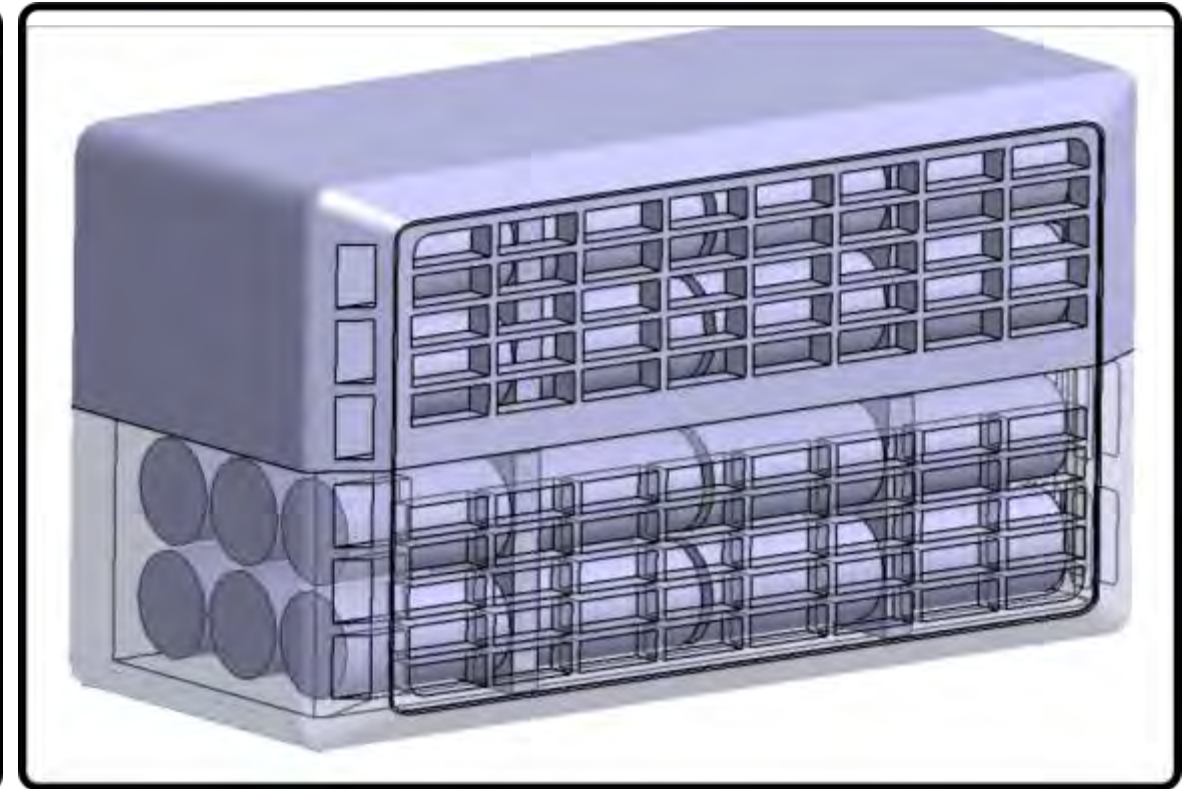
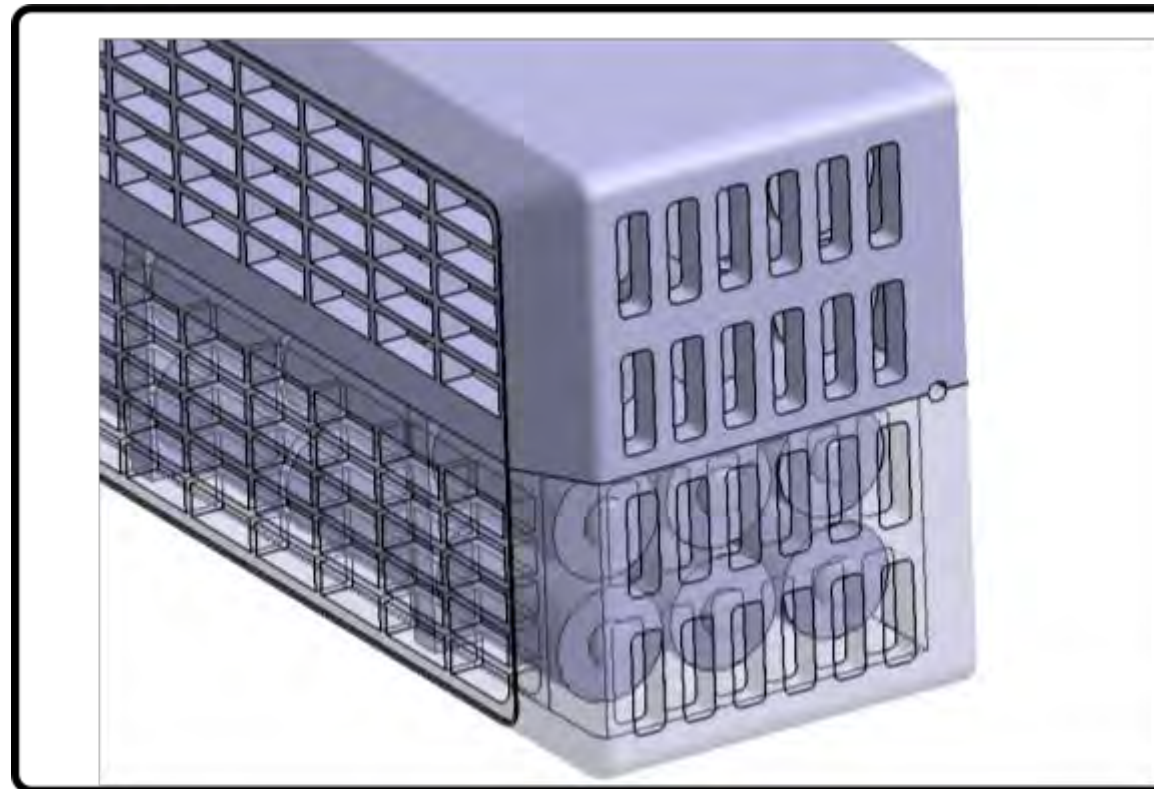
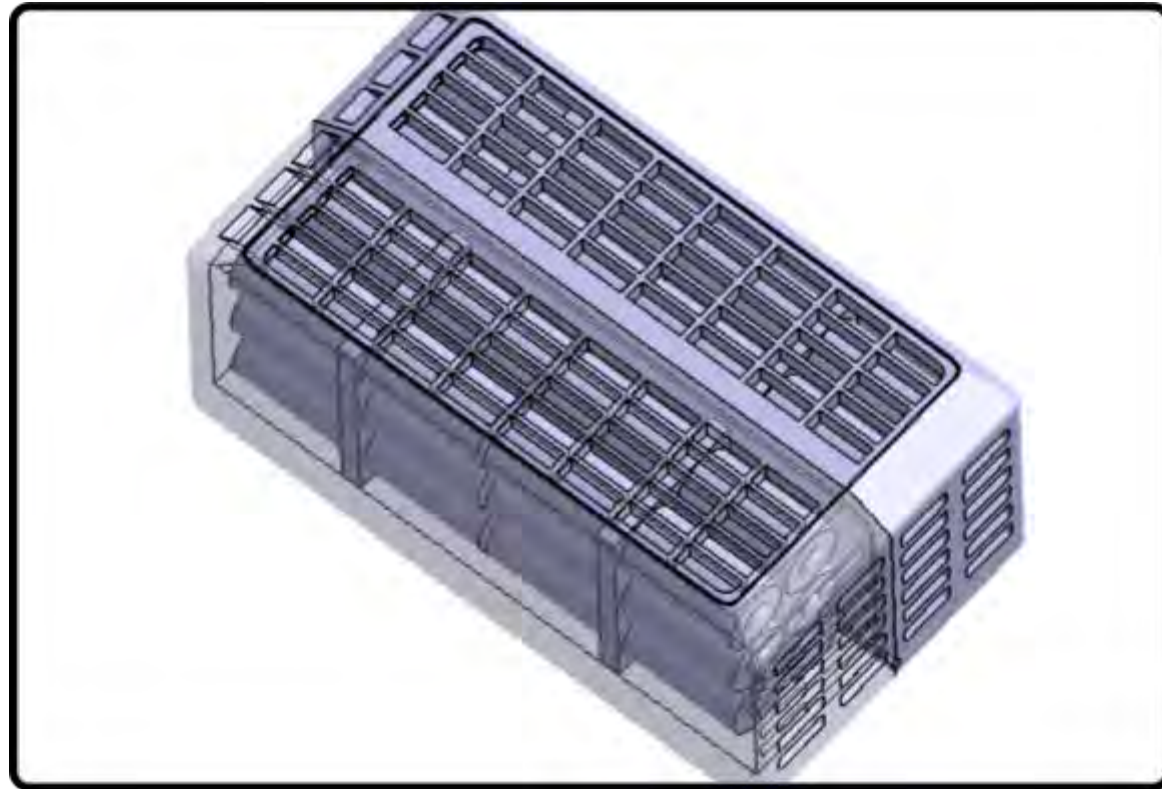
유동의 흐름을 고려하여
Inlet과 Outlet에 홀 생성



Ver3.

Outlet 부분에 홀을 추가

02 Modeling : Ver2



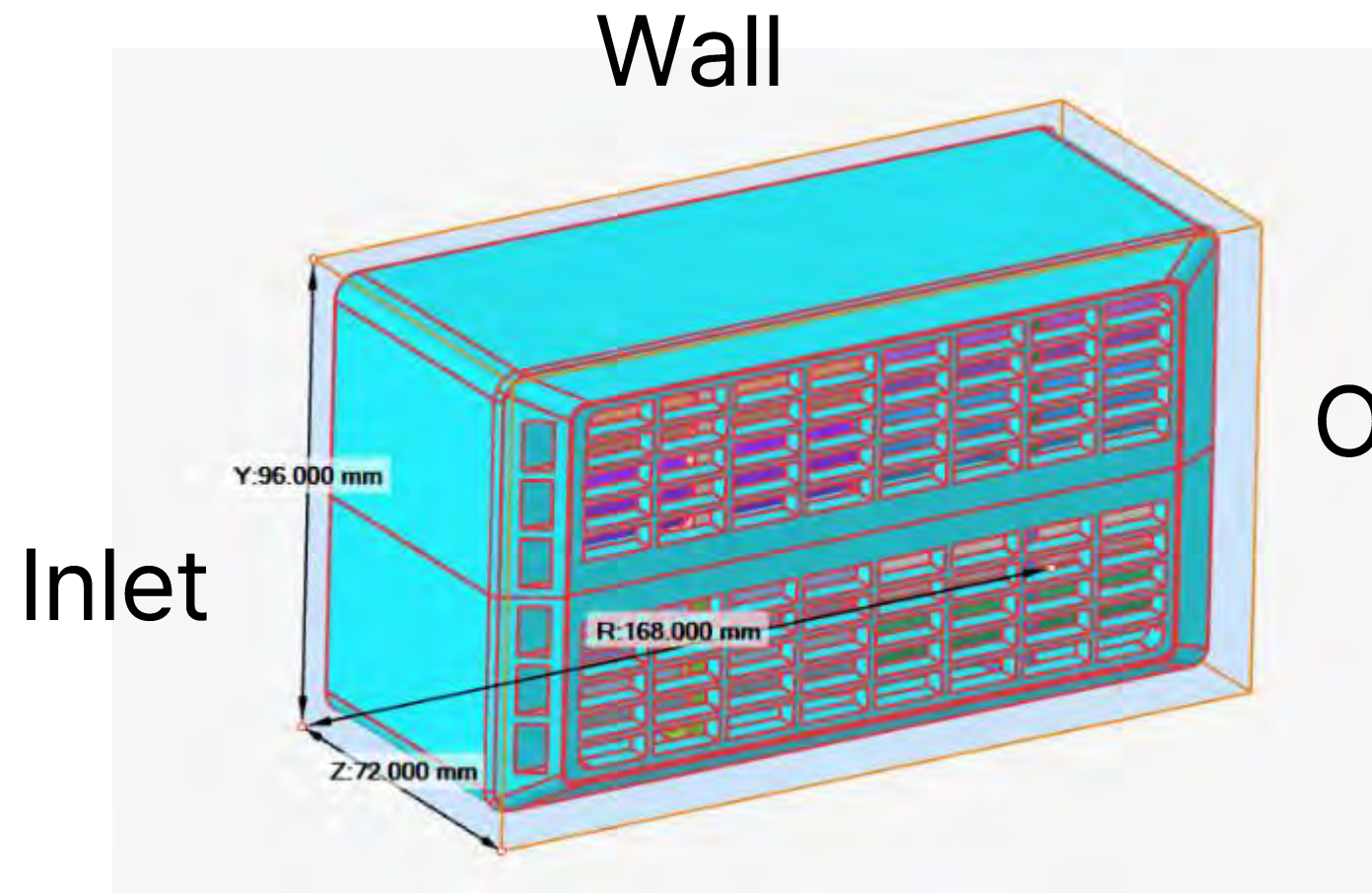
Ver1 기본 모델에서 드론이 순항 중 가장 유동이 많이 받는 면을 타공하여 1차 최적화 된 케이스를 모델링

유동 해석을 통해 부족한 부분을 2차 최적화 할 예정



02 Analysis : Ver2

Flow Box Definition & Boundary Conditions Settings



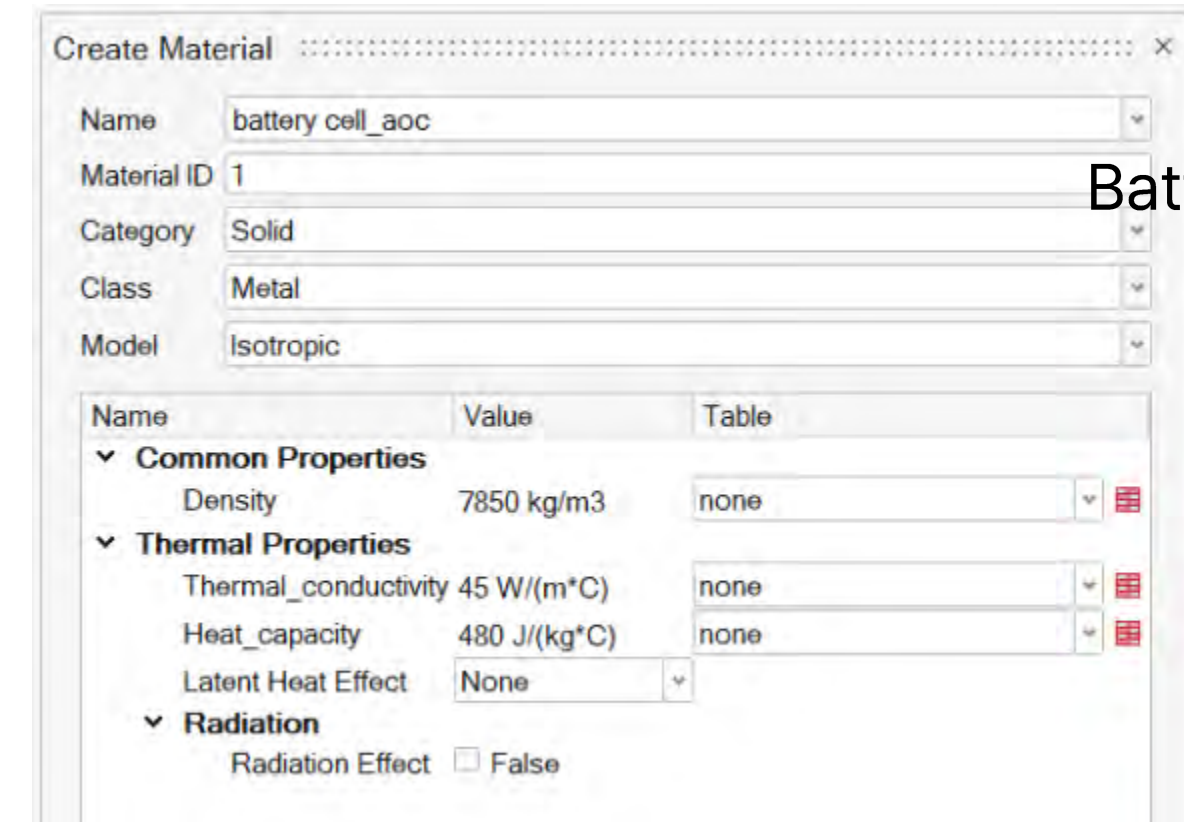
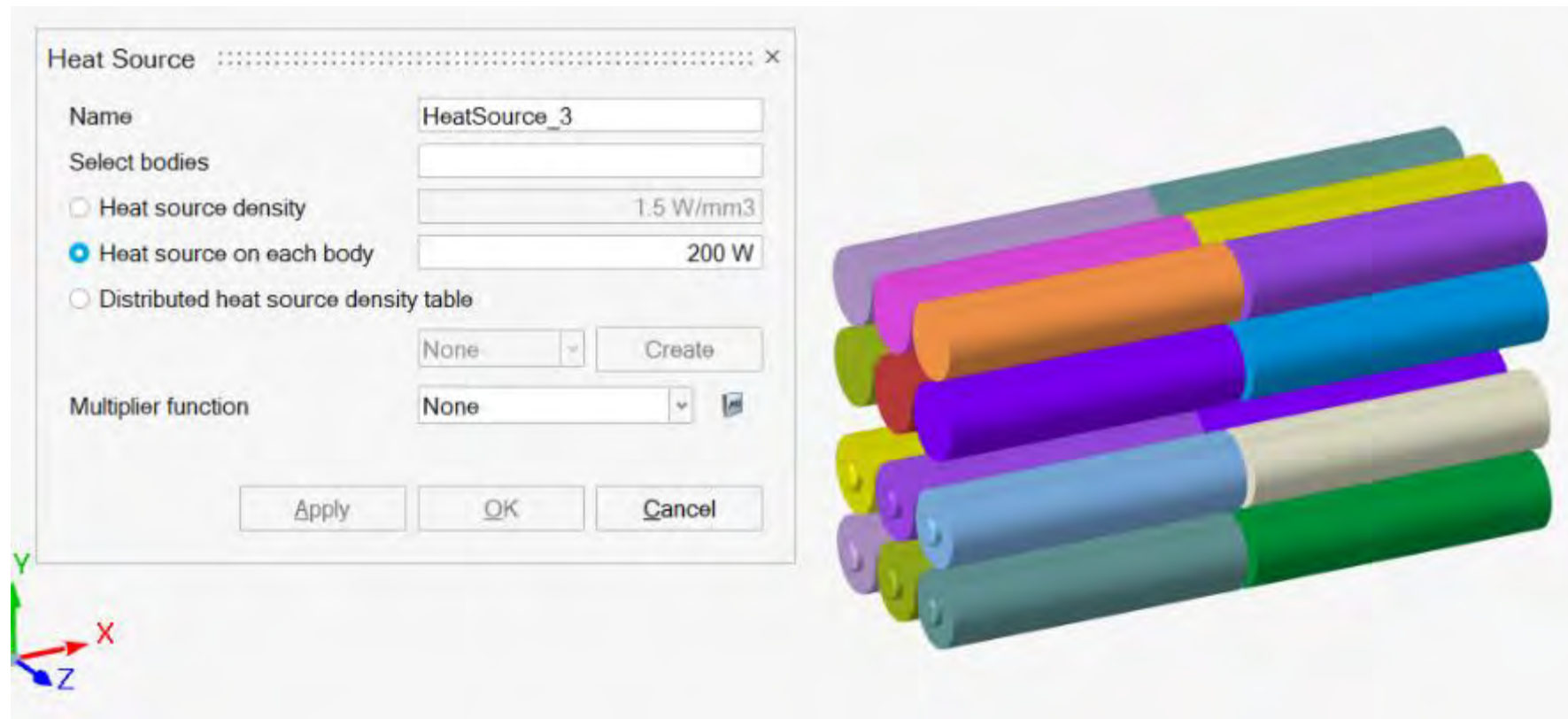
- 배터리 셀에 작용하는 온도 분포를 보기 위해 가로 72mm, 세로 168mm, 높이 96mm 의 Flow Box 생성

- Inlet의 Velocity는 Cruise Speed인 23m/s로 설정
- Outlet Pressure은 계기 압력인 0KPa 설정



02 Analysis : Ver2

Battery Cells Heat source Setting



Battery cell 에 맞는
물성치 부여

- 축적 가능한 총 열량 Q

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

TB60 1셀 질량 : 0.34kg

셀 비열 : 1100 J/kg·K

온도 상승 : 150°C-25°C = 125K

$$Q = (0.34kg) \cdot (1100J/kg \cdot K) \cdot (125K) = 46750J$$

- 시간에 따른 평균 발열량

$$P = \frac{Q}{t}$$

작동 시간 t = 4min = 240s

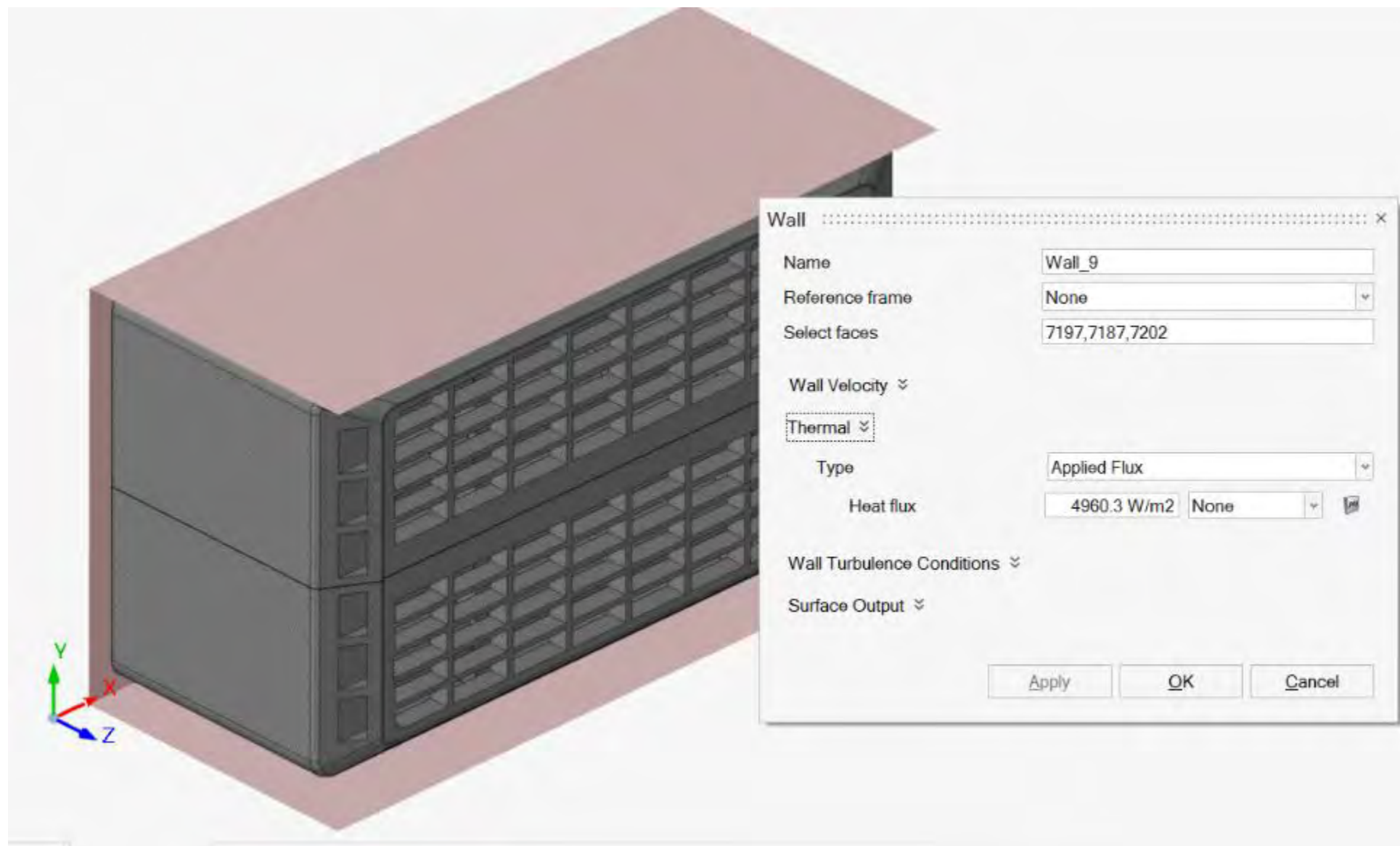
열량 Q = 46750J

$$P = \frac{46750J}{240s} = 194.8W$$



02 Analysis : Ver2

Wall condition Setting



- Applied Flux

유동 Box의 면적 0.04032 mm^2

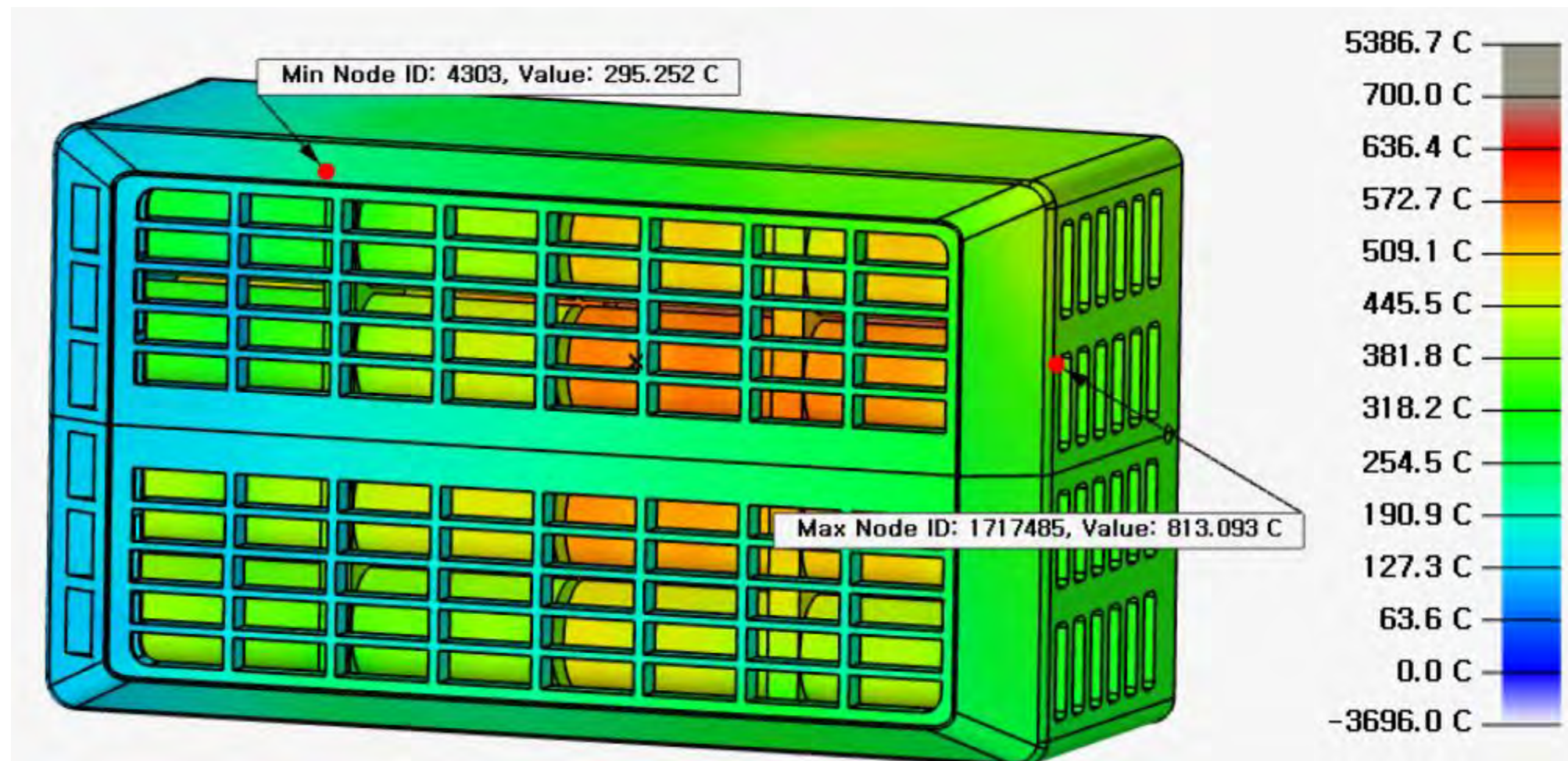
Heat source 200W

$$\text{Applied Flux} = \frac{\text{Heat source}}{\text{Area}} = \frac{200}{0.04032} = 4960.3 \text{ W/m}^2$$



03 Result : Ver2

Acusolve; Temperature Distribution



- Acusolve; Temperature Distribution

$$T_{max} = 813.1^{\circ}\text{C}$$

$$T_{min} = 259.25^{\circ}\text{C}$$

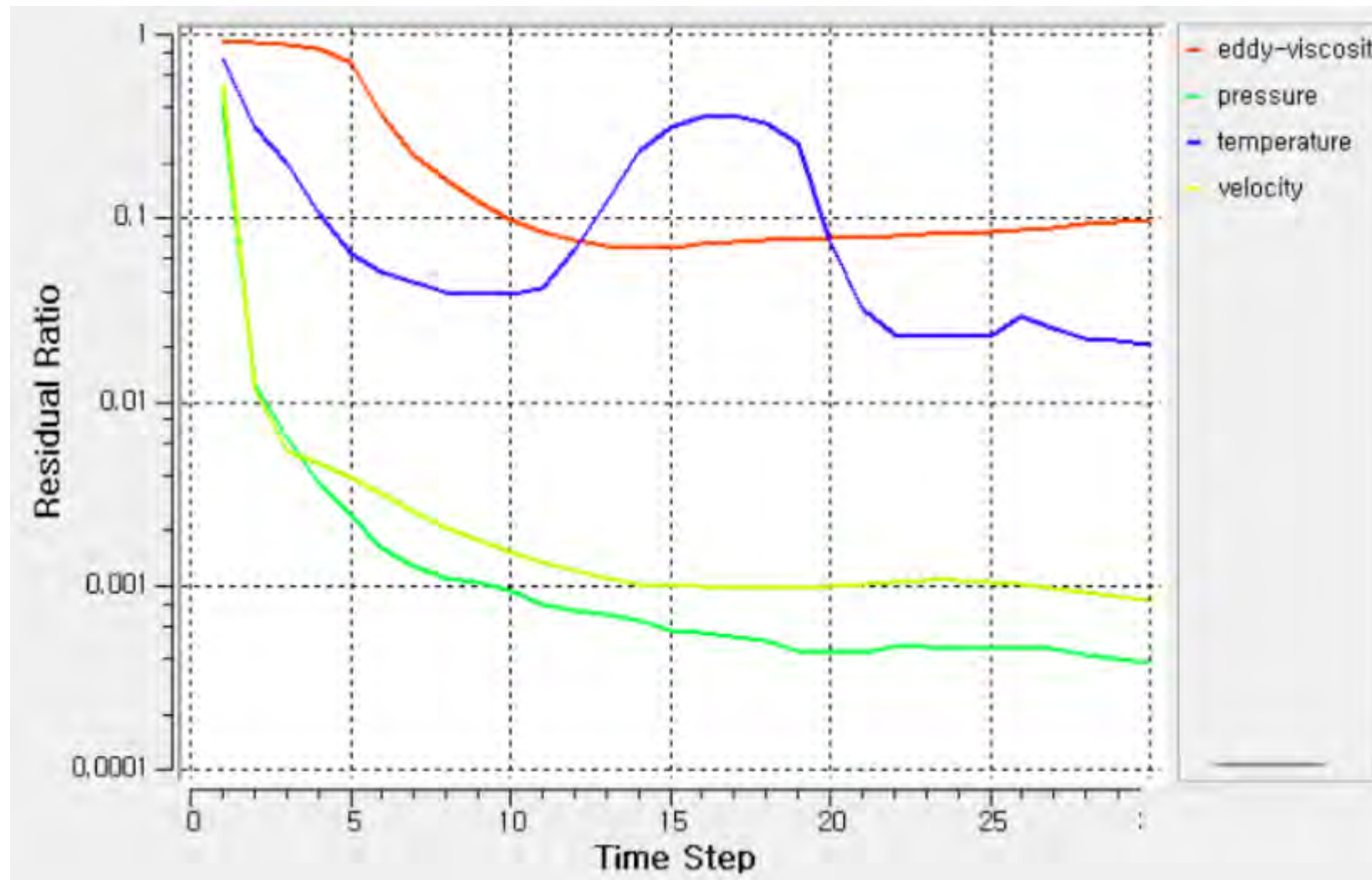
Inlet 부분에 비해 Outlet 측면의 온도가 상대적으로 높음

-> outlet 부분에 유동이 나갈 수 있는 부분을 타공하여 반대쪽의 온도를 감소시키는 것이 목표



03 Result : Ver2

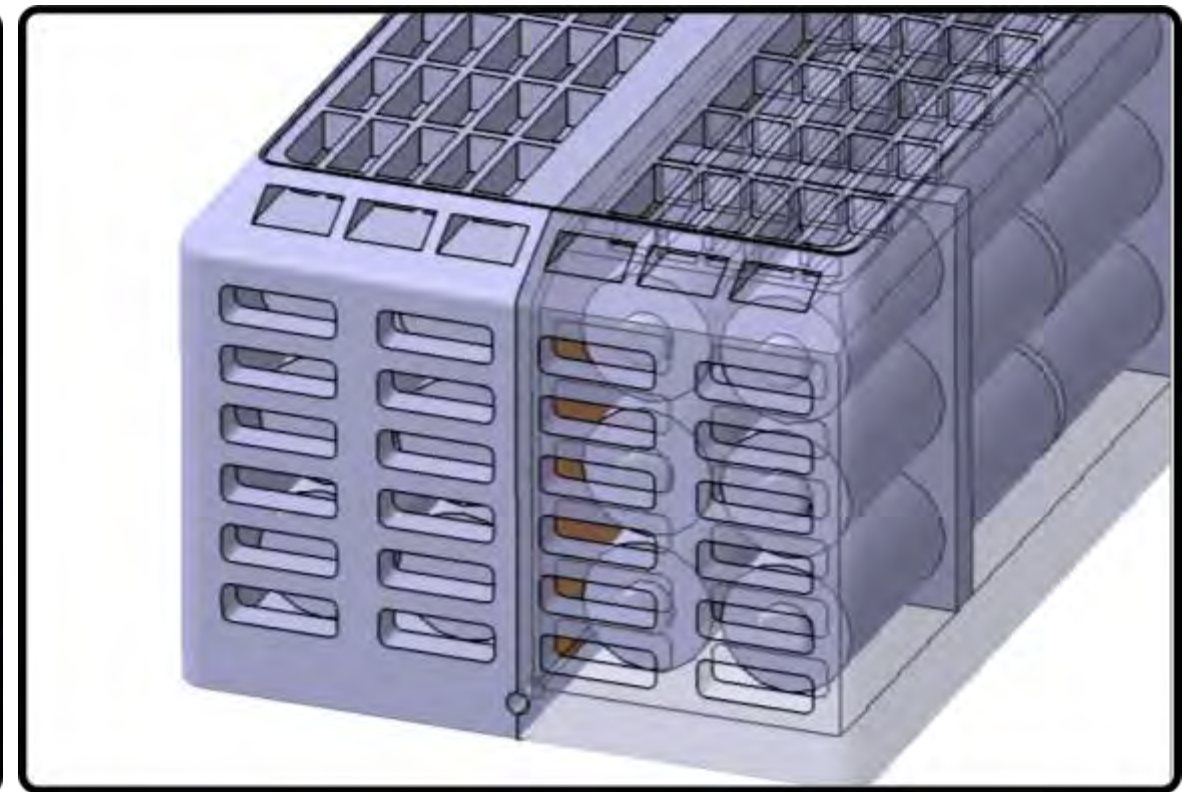
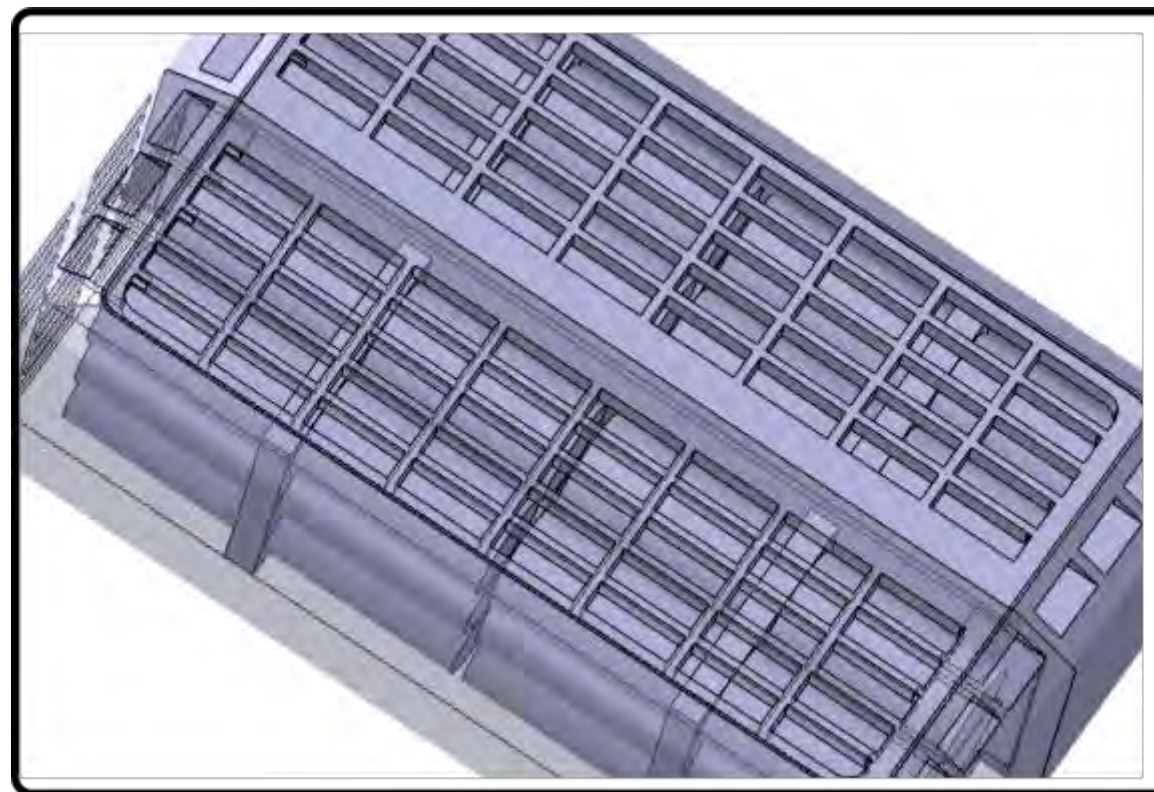
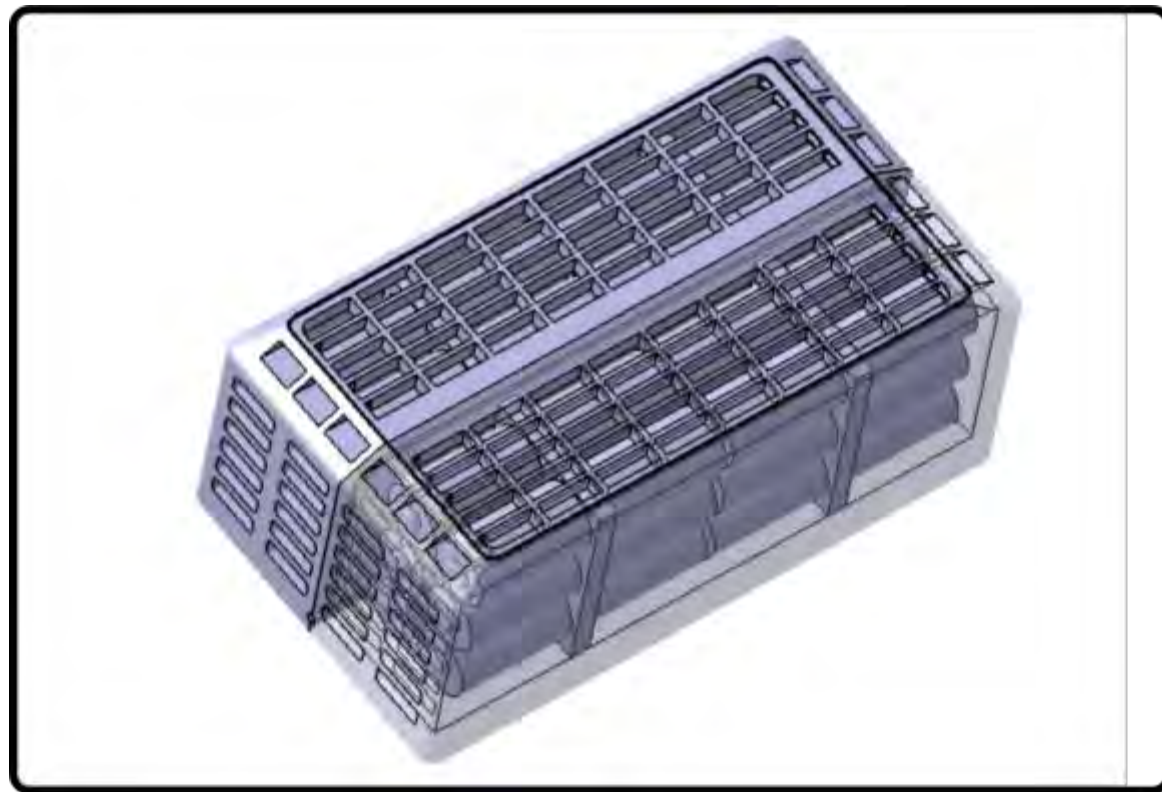
Convergence



- 시간에 따라 Residual 는 감소 -> **해의 수렴성 확인**
- 속도 및 압력은 Time Step 10 이전에 안정적으로 수렴하였으며, 난류 점성 계수도 점진적으로 안정됨



02 Analysis : Ver3



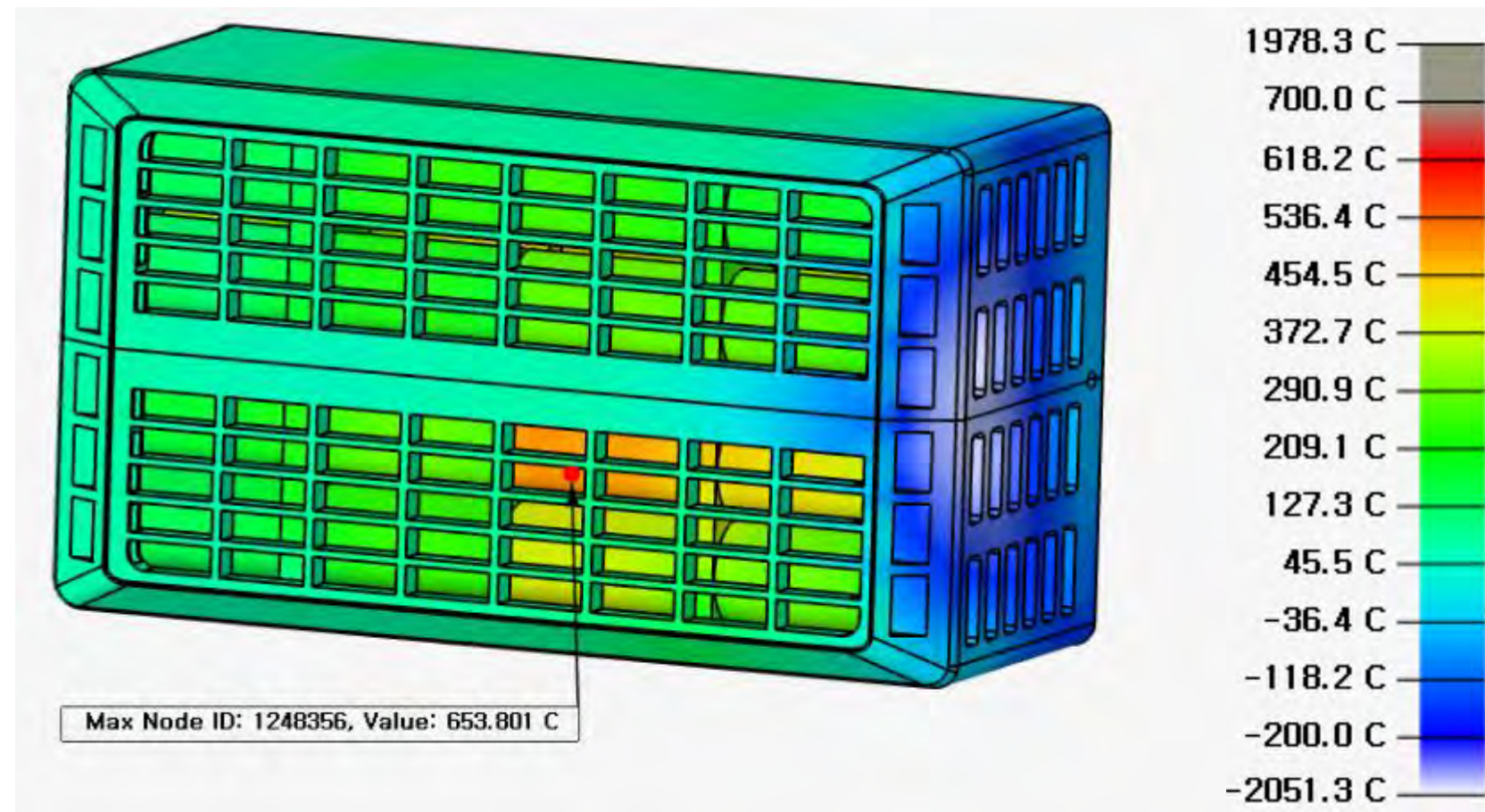
Ver2 모델의 유동해석 결과를 기반으로 Outlet 부분의 타공이 부족하다고 판단 후 재모델링

(Condition은 Ver2와 동일하게 설정)



03 Result : Ver3

Acusolve; Temperature Distribution



- Acusolve; Temperature Distribution

$$T_{max} = 653.8^{\circ}\text{C}$$

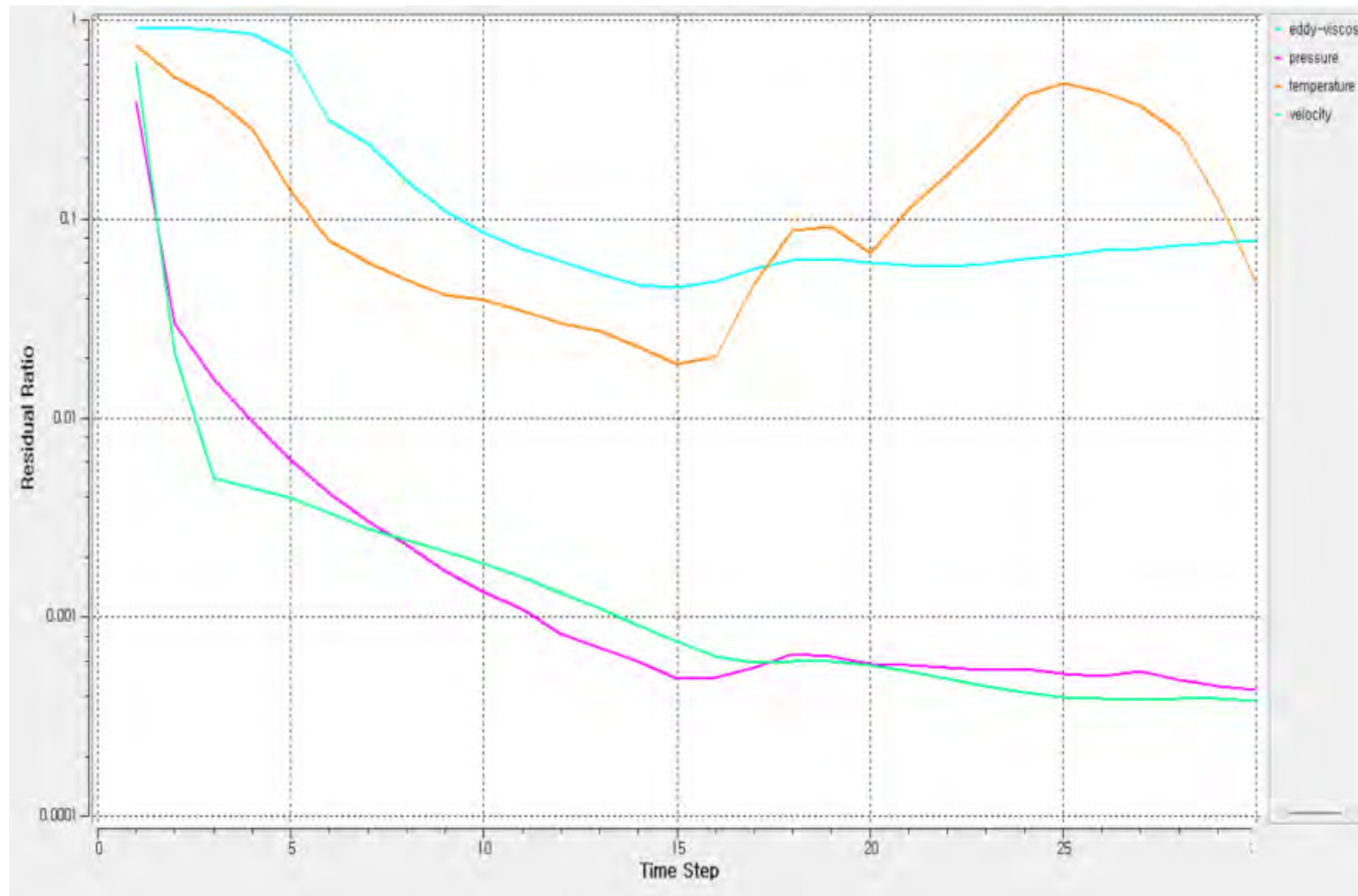
Ver2의 최대 온도보다 약 160°C 감소하여 19.59% 냉각 완료

출구 방면의 온도 또한 확연히 내려간 것을 확인할 수 있음.



03 Result : Ver3

Convergence



- 시간에 따라 Residual 는 감소 -> **해의 수렴성 확인**
- Temperature가 중간에 한번 상승했지만 다시 감소
- 속도 및 압력은 Time Step 15 이전에 안정적으로 수렴하였으며, 난류 점성 계수도 점진적으로 안정됨

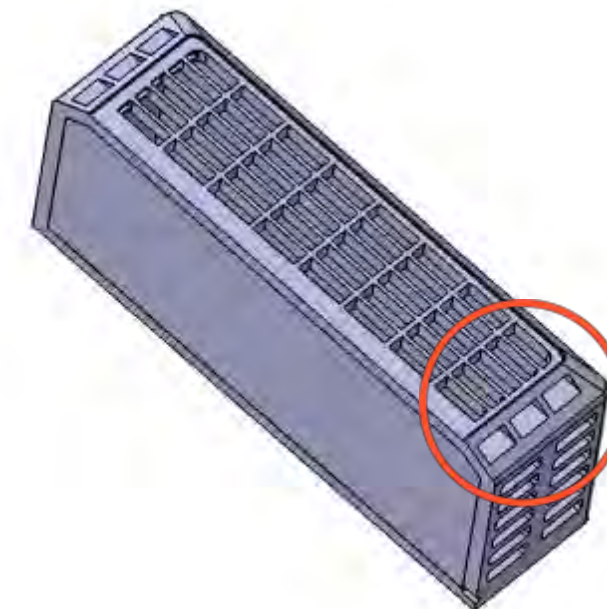
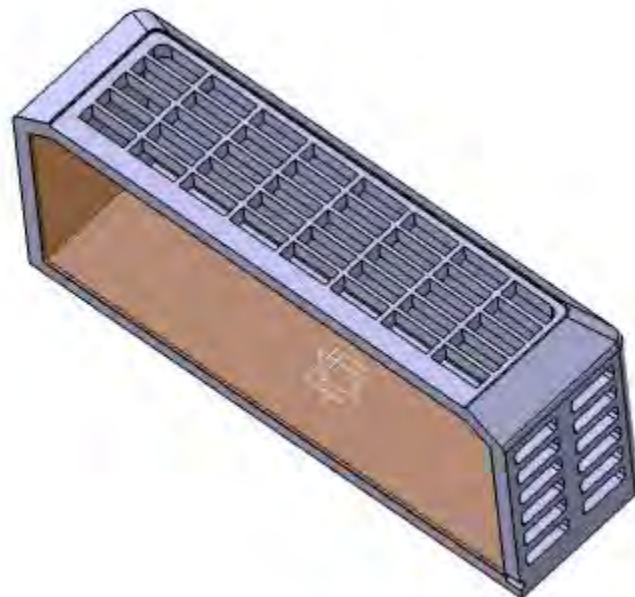
03 Result

Ver2	
최대온도	813.1°C
Inlet, Upper, Outlet 부분에 홀 생성	



Ver3	
최대온도	653.8°C
Outlet 부분의 온도상승으로 유동이 더 빠져나가 냉각될 수 있도록 홀 생성	

Ver2의 최대 온도보다 약 160°C 감소하여 **19.59% 냉각 완료**



Project 2

: Battery Case Optimize

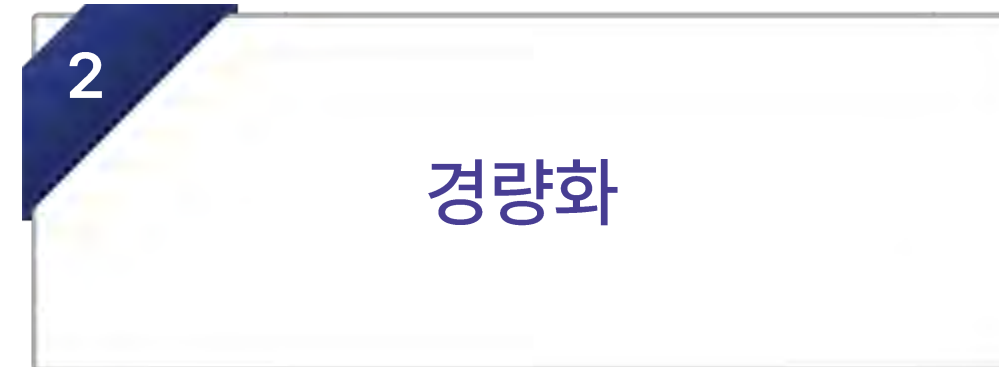
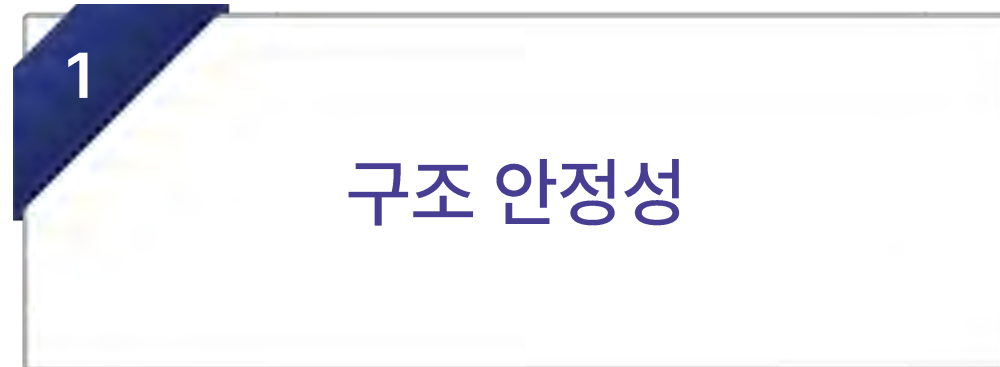
Thickness Optimize



Thickness Optimize

01 Outline

Tool Selection



Research Objective

배터리 케이스에 여러 힘이 작용될 때, 안전율과 그때의 최소 두께를 찾아 최적화하는 것을 목표

Tool Selection

조건(복합하중, 안전율, 범위 등) 기반 자동 최적화 가능

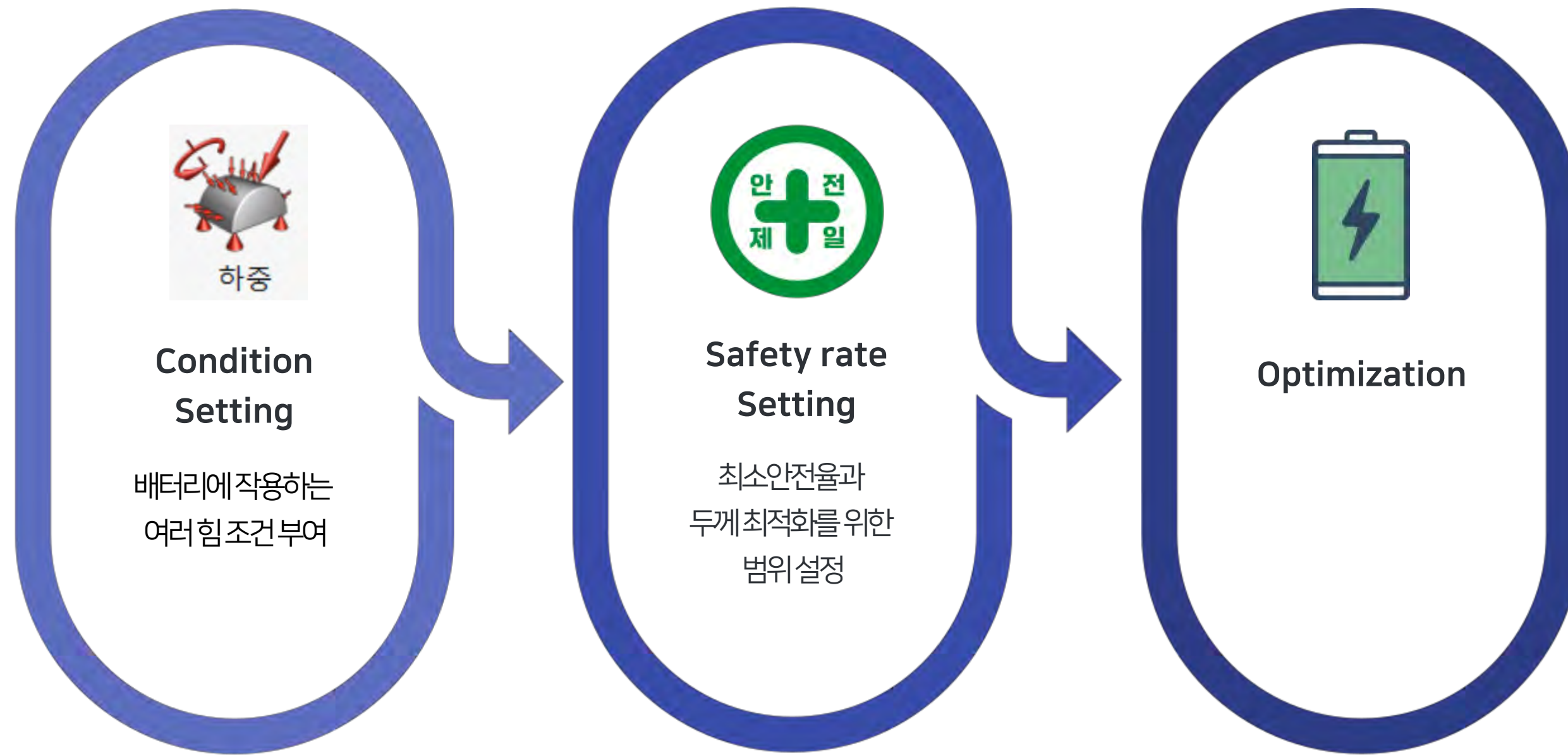
게이지 최적화를 지원하여 복잡한 구조도 면 단위로 두께를 자동 조정





01 Outline

Inspire WorkFlow





01 Outline

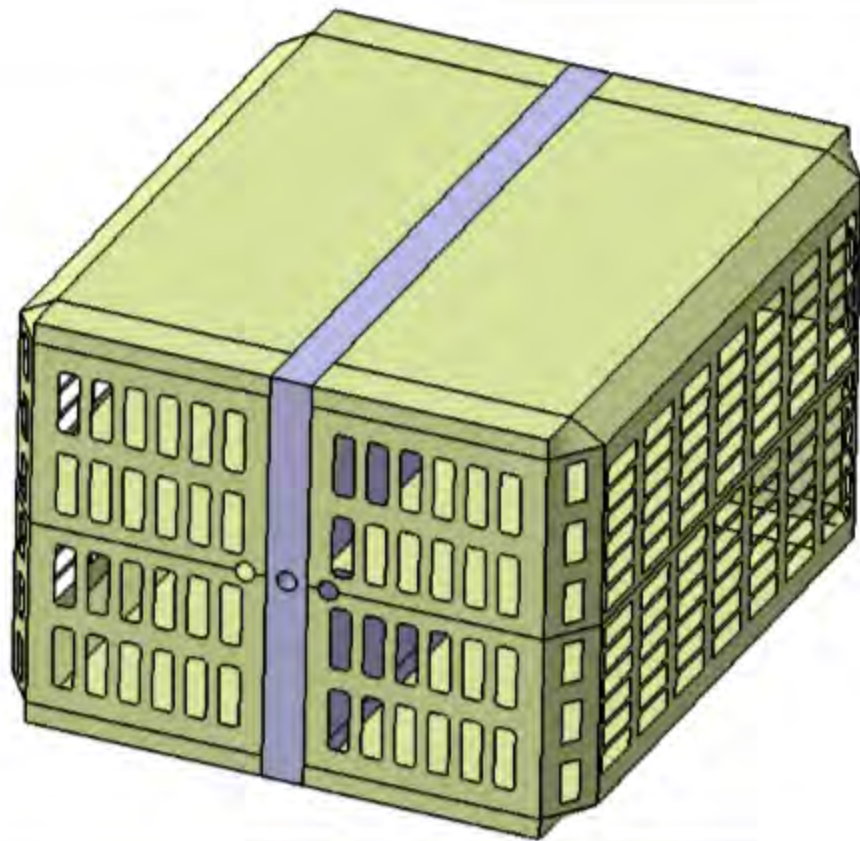
소화탄으로 인해 증가된 무게를 케이스 **두께 최적화로 무게 감량**을 진행시켜 최소 안전율 도모



드론 순항 中 배터리 케이스에 작용되는 힘을 정확히 분석하고,
이를 케이스에 적용시켜 **경량화 된 모델링 필요**



02 Modeling



두께 최적화를 위해 가운데 정해진 벽을 제외하고 서피스로 모델링
드론과 연결되는 부분에 구멍을 뚫어 토크가 들어갈 수 있도록 해줌

$$0.4\text{mm} \leq \text{Thickness} \leq 5\text{mm}$$

강성과 무게를 보장하기 위한 수준의 상·하한치 설정



03 Analysis

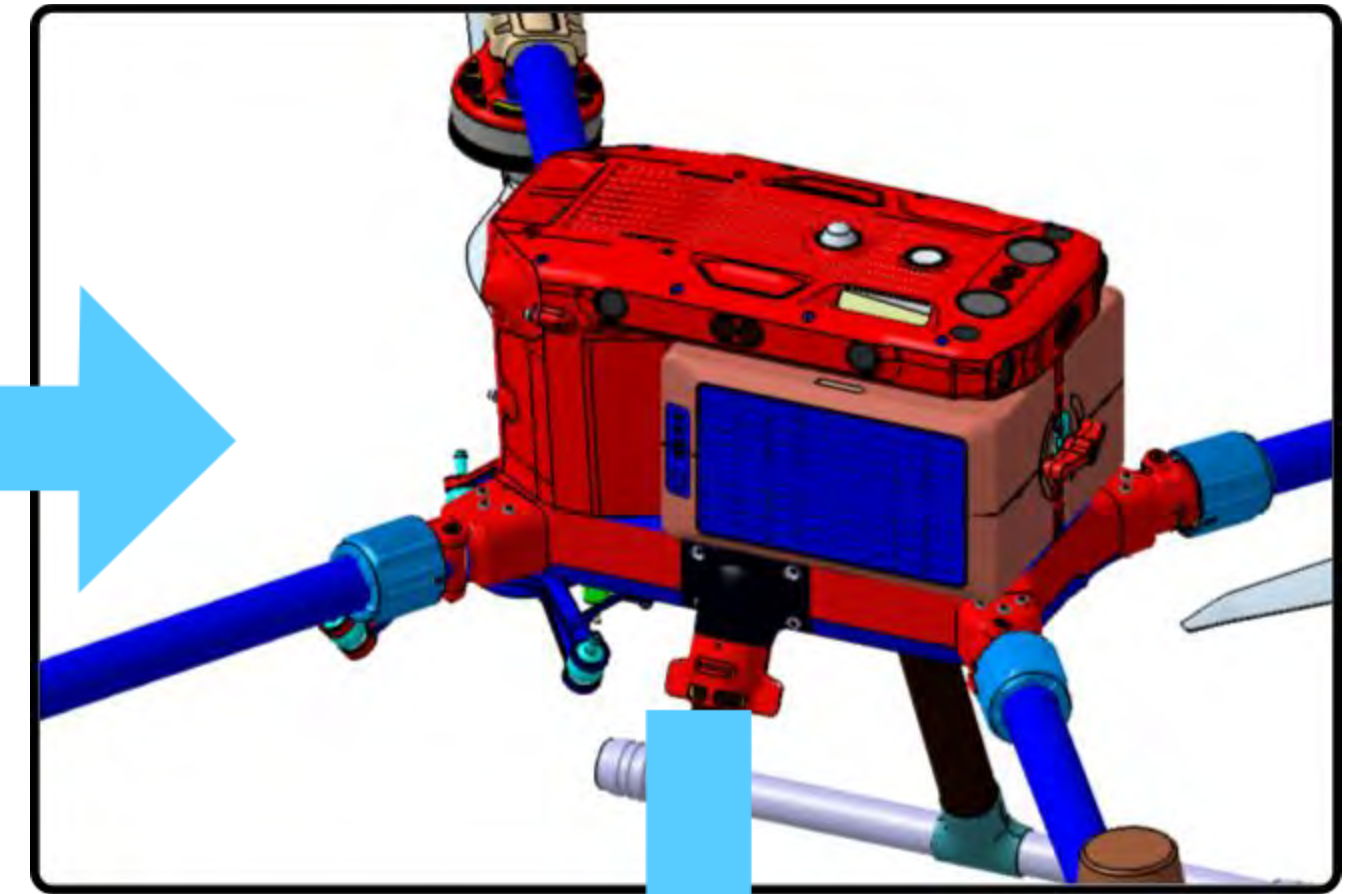
Q4

바람의 세기는 산불의 확산에 어느 정도 영향을 미치나요?

A

국립산림과학원의 실험 결과, 바람이 없을 때, 30° 경사면에서 산불이 분당 0.57m의 느린 속도로 확산되었지만, 바람이 6m/s의 속도로 불면 바람이 없을 때 보다 26배나 빨라졌습니다. 바람이 불면 화염이 옆으로 누우면서 확산 속도는 더욱 빨라집니다. 2019년 고성·속초 산불도 최대 순간풍속이 35.6m/s로, 발화지에서 약 7.7km 떨어진 해안가까지 확산되는데 90여 분도 채 걸리지 않았으며, 이는 1시간에 5.1km를 이동한 셈입니다.

항력



중력

드론의 속도 23m/s 와 산불 현장에서의
풍속 약 35.6m/s 을 감안하여 58.6m/s로 항력 계산
케이스의 두 면에 항력 적용

무게 약 9kg

$W=mg=(9\text{kg}) \cdot (9.81\text{m/s}^2)=88.29\text{N}$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_D \cdot A$$

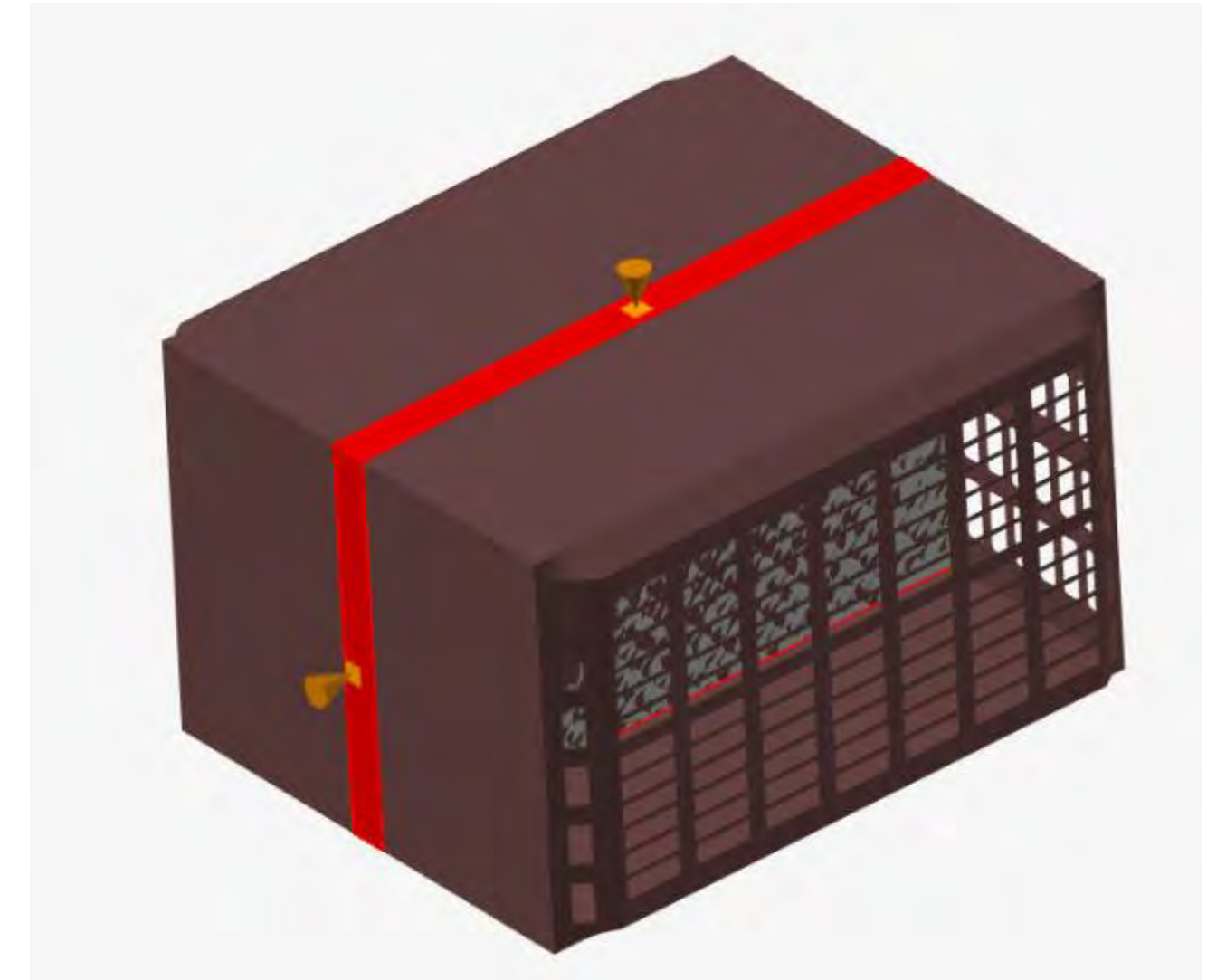
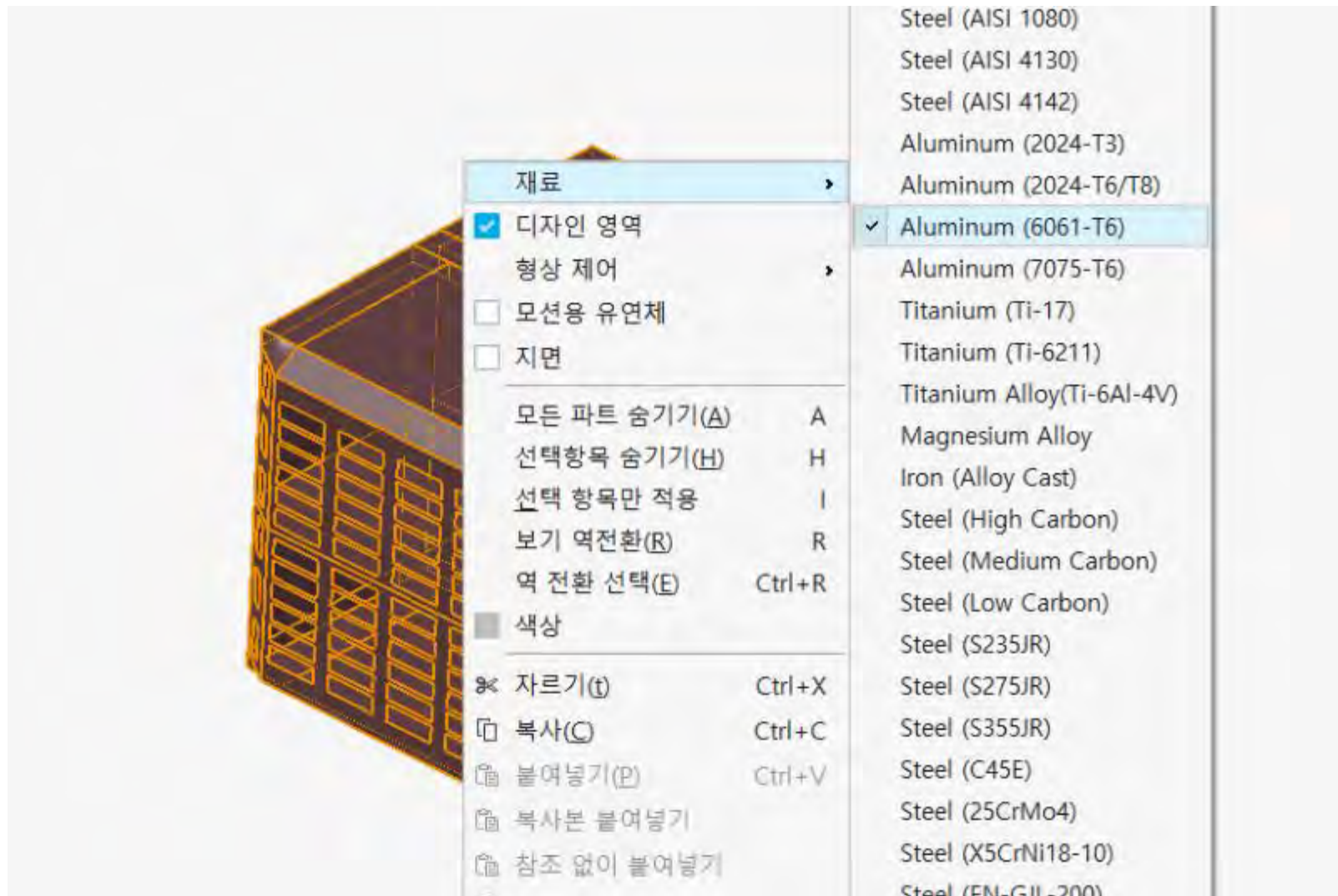
$$= \frac{1}{2} (1.225\text{kg/m}^3) (58.6\text{m/s})^2 (1.2) (0.0154\text{m}^2) = 38.9\text{N}$$

$$= \frac{1}{2} (1.225\text{kg/m}^3) (58.6\text{m/s})^2 (1.2) (0.0141\text{m}^2) = 35.6\text{N}$$



03 Analysis

지지부 설정



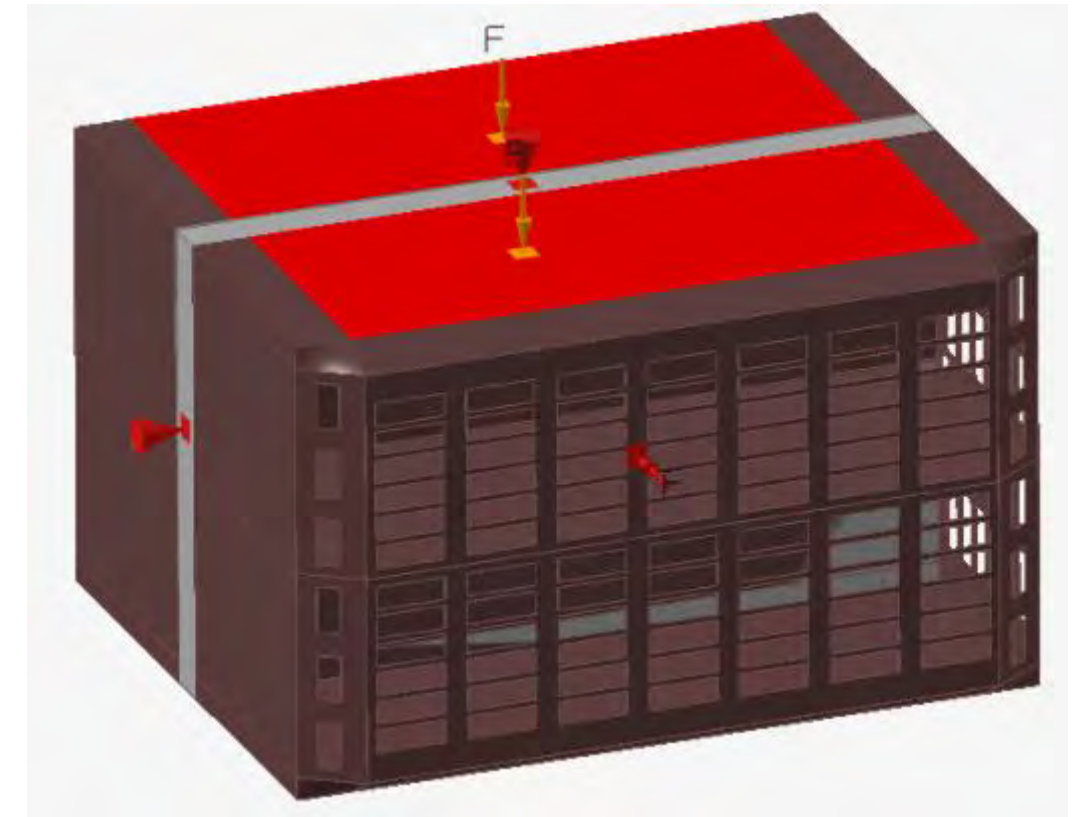
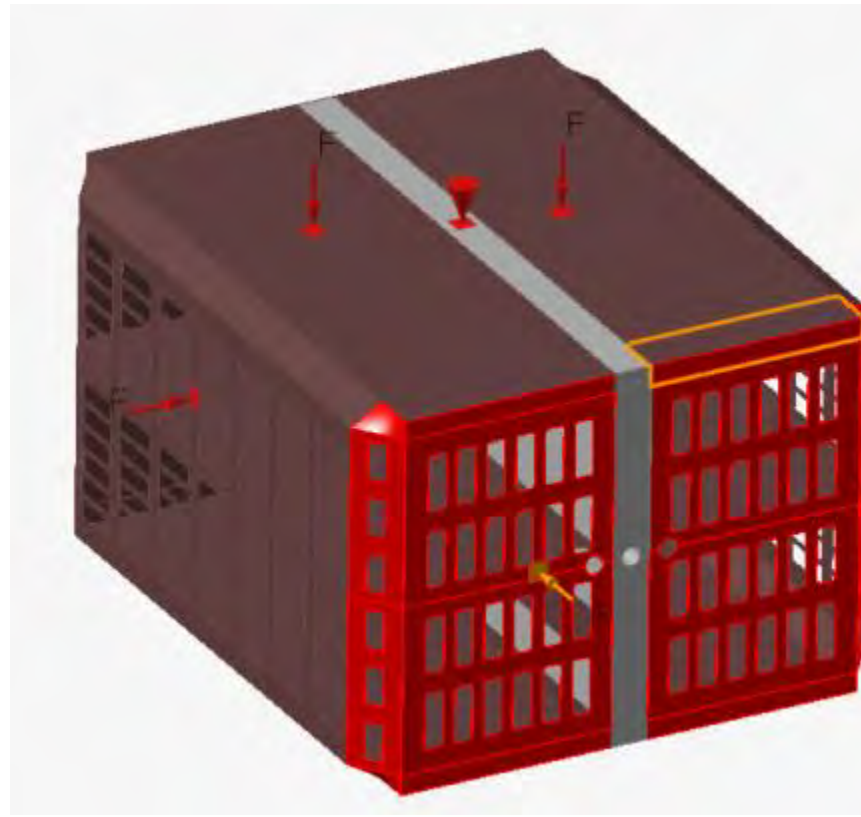
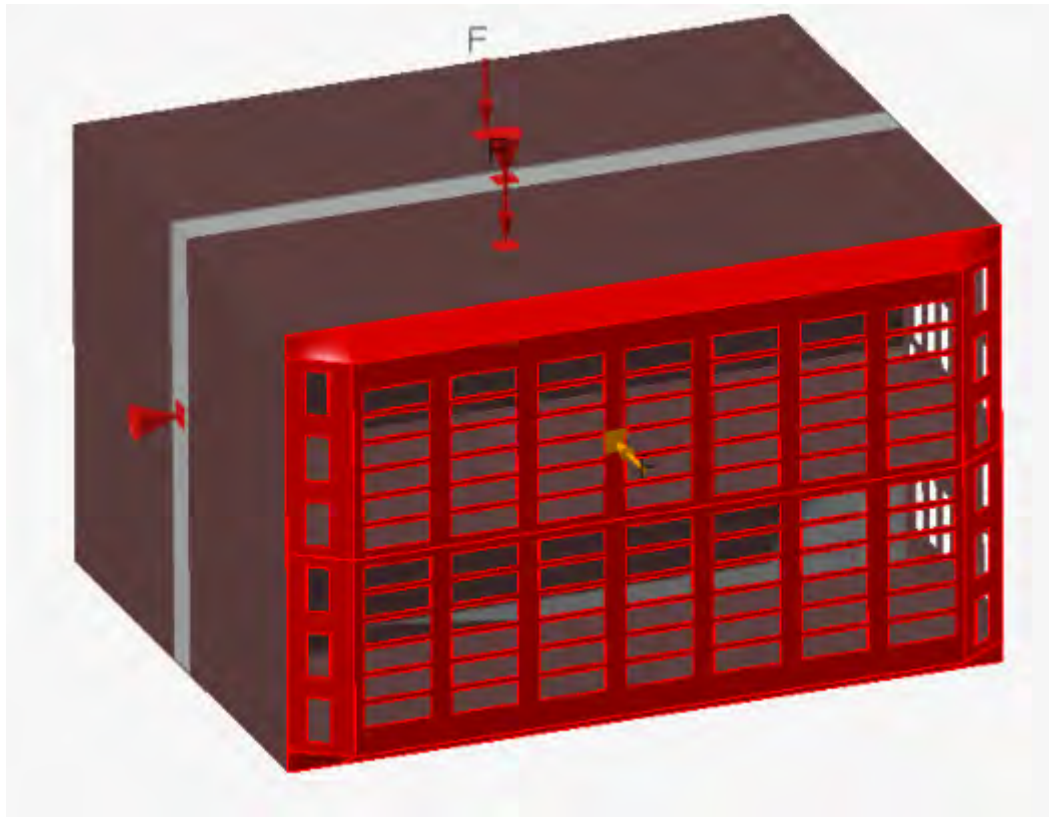
- 재료 Aluminum 6061-T6 Setting
- 디자인영역 부여

드론 본체와 맞닿아 있어 고정되는 부분에 **지지부 설정**



03 Analysis

앞서 구한 항력과 중력 힘 대입



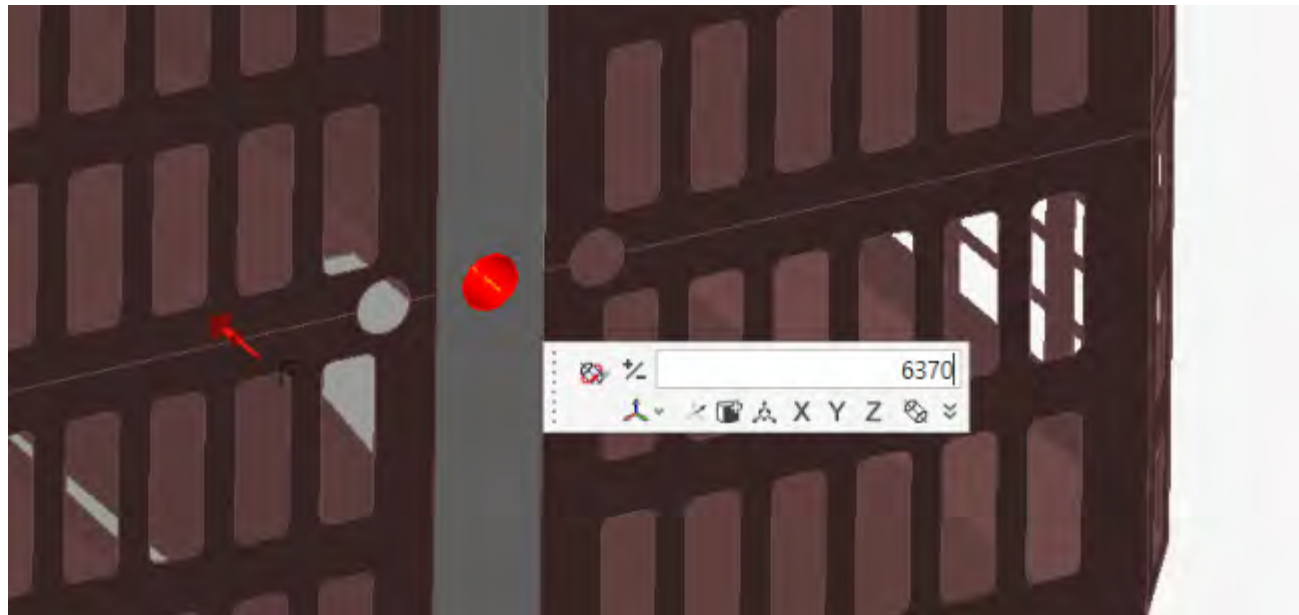
항력 38.9N, 35.6N

중력 88.29N



03 Analysis

패스너 부분 토크 적용



$$T = k \cdot F \cdot d$$

$k = 0.2$ (일반적인 마찰계수)

$d = 0.005mm$

$F = 0.7 \cdot \sigma_y \cdot A = 0.7 \cdot 640 \cdot 14.2 \times 10^{-6} = 6.37N$

(체결력은 보통 볼트 항복하중의 70~80%)

$\sigma_y = 640MPa$ (항복강도 일반 8.8 등급)

$A = 14.2mm^2$ (인장면적 ISO 규격 기준)

$$T = 0.2 \cdot 6370 \cdot 0.005 = 6370N \cdot mm$$



03 Analysis

최적화 실행

이름: Thickness Optimization

유형: 게이지

목표: 질량 최소화

요소 크기: 2.0 mm

게이지 두께

디자인 영역	현재	최소	최대
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm
NONE	1.0 mm	0.4 mm	5.0 mm

응력 구속조건

☐ 없음

☒ 최소 안전 계수: 2.0

게이지 최적화 수행

질량 최소화를 최적화 목표로 설정했음.

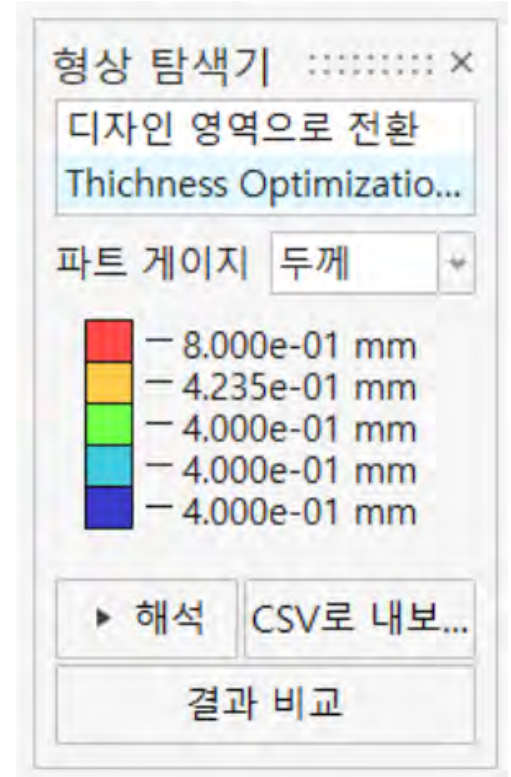
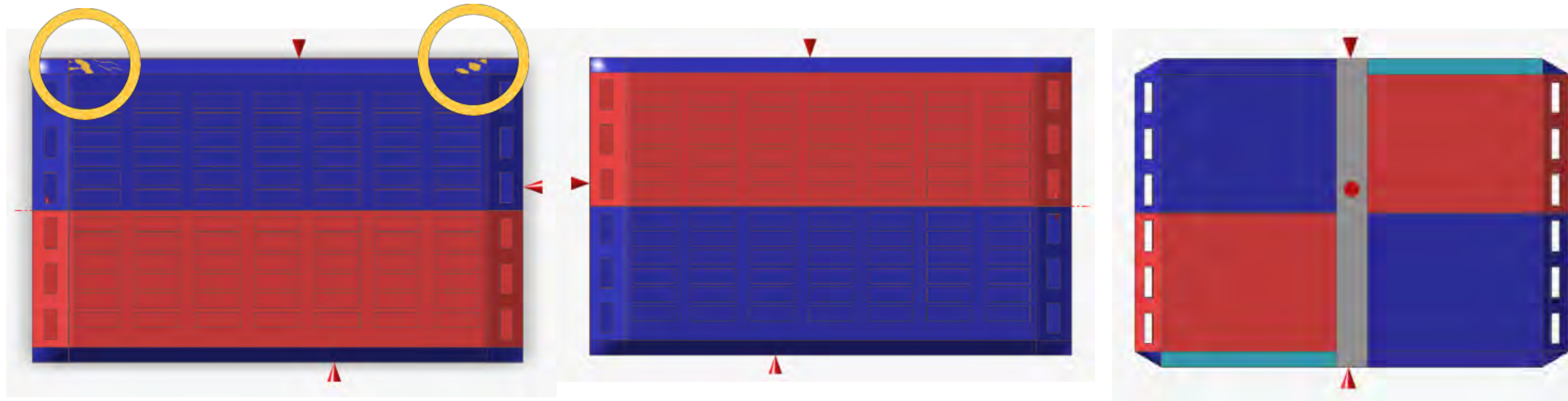
요소 크기 : 2.0 mm

두께의 상 · 하한치 : $0.4\text{mm} \leq \text{Thickness} \leq 5\text{mm}$

최소 안전율 2.0을 주어 강풍에도 구조적 안정성을 확보하고자 함.



04 Result



- 강성이 필요한 영역은 0.8 mm까지 유지되었고, 불필요한 영역은 0.4 mm로 경량화됨
- 특히 상판 모서리와 하부 접합부 근처에서 높은 두께 분포가 나타나 구조적 응력이 집중됨을 확인할 수 있음
- 설계 기준 최소 안전율 2.0을 만족하며, 구조 안정성과 경량화를 동시에 확보함.
- 양쪽 측면은 바람(항력) 하중이 작용하는 면이므로 두께 유지
- 윗면/아랫면은 중력 방향 하중과 지지 조건 연결로 인한 응력 집중 → 두꺼워짐

04 Overall Result

배터리 케이스 유동해석 결과

- SimLab과 사용하여, 케이스의 홀을 단계적으로 뚫어 **배터리 셀의 온도 변화**를 살펴봄
- 케이스 Ver3는 이전 Ver2보다 **약 20% 배터리 셀의 온도를 감소**시킬 수 있음

배터리 케이스 두께 최적화

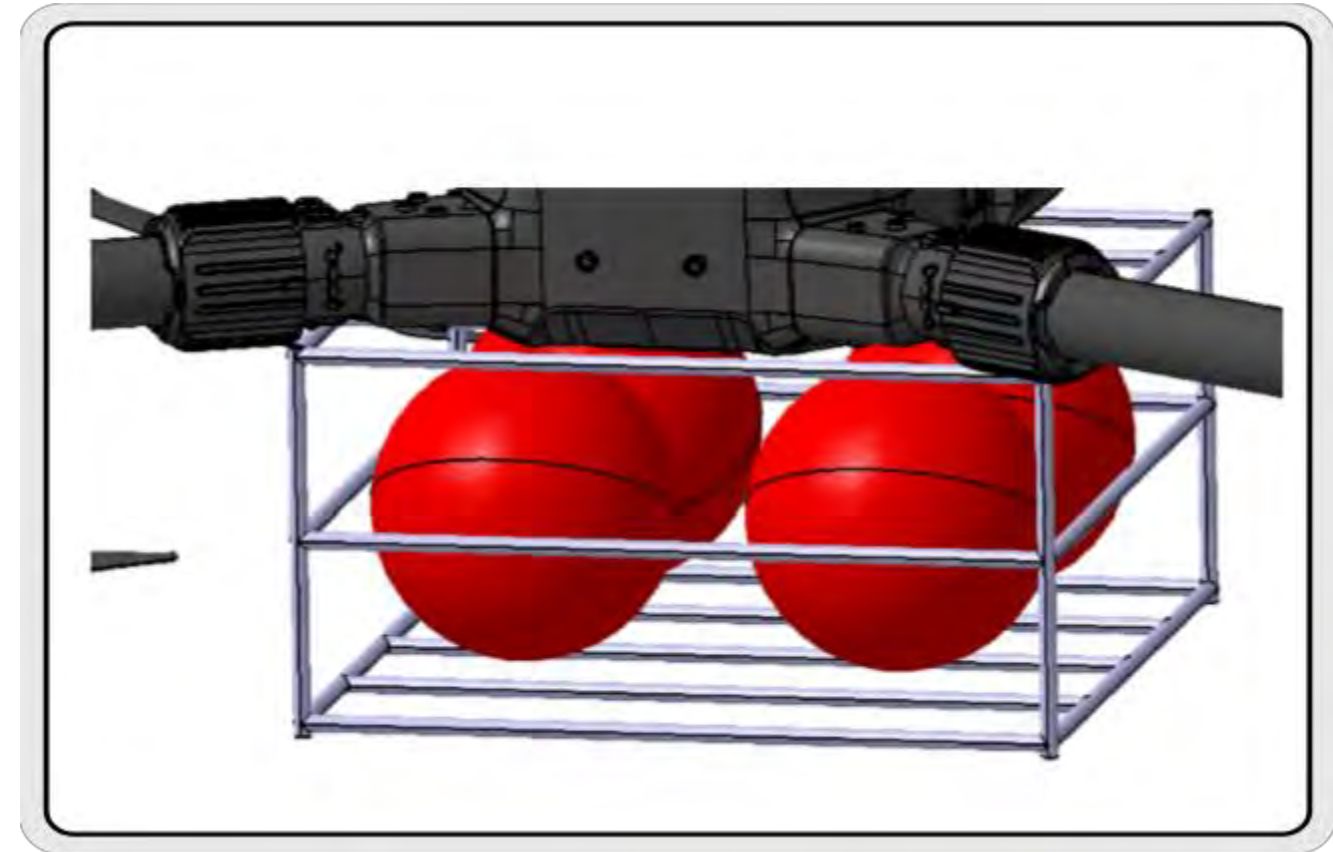
- 케이스에 작용하는 힘을 적용시켜 **최소 안전율에 대한 최적화 된 두께**를 확보함
- 여러 조건들에 기반하여 대칭적인 구조를 이룸
- 결과적으로 배터리의 **온도적인 측면**과 **구조 안정성 요건 충족**하는 형상 확보

Drone Optimization

Drone Optimization



01 Example



- 위와 같이 최적화 된 소화탄 케이스를 랜딩기어 삼아 이착륙을 할 수 있음
- 배터리 케이스 또한 드론의 사이즈에 맞춰 장착

02 Expected effect

- 알테어 솔루션의 실무 적용성 입증

HyperStudy, SimLab, Physics AI, Inspire 등 알테어의 최적화 및 데이터 기반 예측 기술을 실제 재난 대응 시스템 설계에 성공적으로 접목함으로써, 산업계·공공기관을 대상으로 한 기술 확산 가능성 제고.

- 화재 진압 효율성 극대화

기존 드론 플랫폼에 가스 하이드레이트 소화탄을 효과적으로 탑재함으로써, 산불·공장화재 등 재난 현장에서 신속하고 광역적인 초기 진압이 가능해짐. 이는 인명·재산 피해를 획기적으로 줄일 수 있음.

- 설계 프로세스 자동화 기반 확보

Parametric 모델링과 자동화된 시뮬레이션 스크립트를 구축함으로써, 다양한 소화탄 사양 및 임무 조건에 맞는 맞춤형 드론을 빠르게 설계할 수 있는 기반 마련.

- 국가 재난안전 기술 R&D와의 연계 가능

산불 대응, 재난 드론 기술 등 정부 재난안전기술개발 로드맵과 직접 연계되는 주제로, 향후 기술 이전 및 국책과제화 가능성 확보.

Reference

- Khan, S. A., Mehmood, Z., & Afshan, Z. (2021). Design, analysis and topology optimization of a landing gear strut for a quadcopter upon impact. Proceedings of the 2021 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM). <https://doi.org/10.1109/ICAEM53552.2021.9547116>
- Han, D., & Barakos, G. N. (2021, September 7–9). Comparison of design features of quadrotor aircraft and helicopters from the point of view of flight performance. Presented at the 47th European Rotorcraft Forum, United Kingdom.
- 이주동, 전창수, & 남대근. (2024). 가스 하이드레이트 소화탄 및 이를 이용한 화염 진압 방법 [등록특허 제10-2728339호]. 대한민국특허청.
- 행정안전부. (2023). 제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획: 2023년도 범정부 시행계획(안). 국가과학기술자문회의 심의회의 운영위원회.
- 박형준. 산불 진화를 위해 소화탄을 탑재한 드론 프레임 설계에 대한 연구. 한국기계가공학회.
- Berno, M. (2024, September 12). Vibration testing standards for aerospace manufacturers. ETS Solutions. Retrieved from <https://www.etssolution.com/applications/essential-vibration-testing-standards-and-requirements-for-aerospace-manufacturers>
- 사랑두리의 미래. (2019). 점성계수: 온도-의존 동점도 및 운동점도 그래프. 티스토리 블로그.
- DJI. (n.d.). Matrice 300 RTK 지원. DJI Korea. Retrieved August 6, 2025, from <https://www.dji.com/kr/support/product/matrice-300>
- Korea Forest Service. (2020). How much does wind speed affect the spread of wildfires? Retrieved from https://www.forest.go.kr/kfswweb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=3160795&bbsId=BBSMSTR_1032

THANK YOU

Team : 드론119