



AOC 2018

Optimization of electric scooter

Taeyang, Choi Haejoon, Choi

Ulsan National Institute of Science and Technology

Mechanical Engineering

Advisor – Prof. Namhun, Kim

Contents

1. Introduction

- Scooter concept
- Required scooter specification
- Existing scooter specification

2. Design space designation

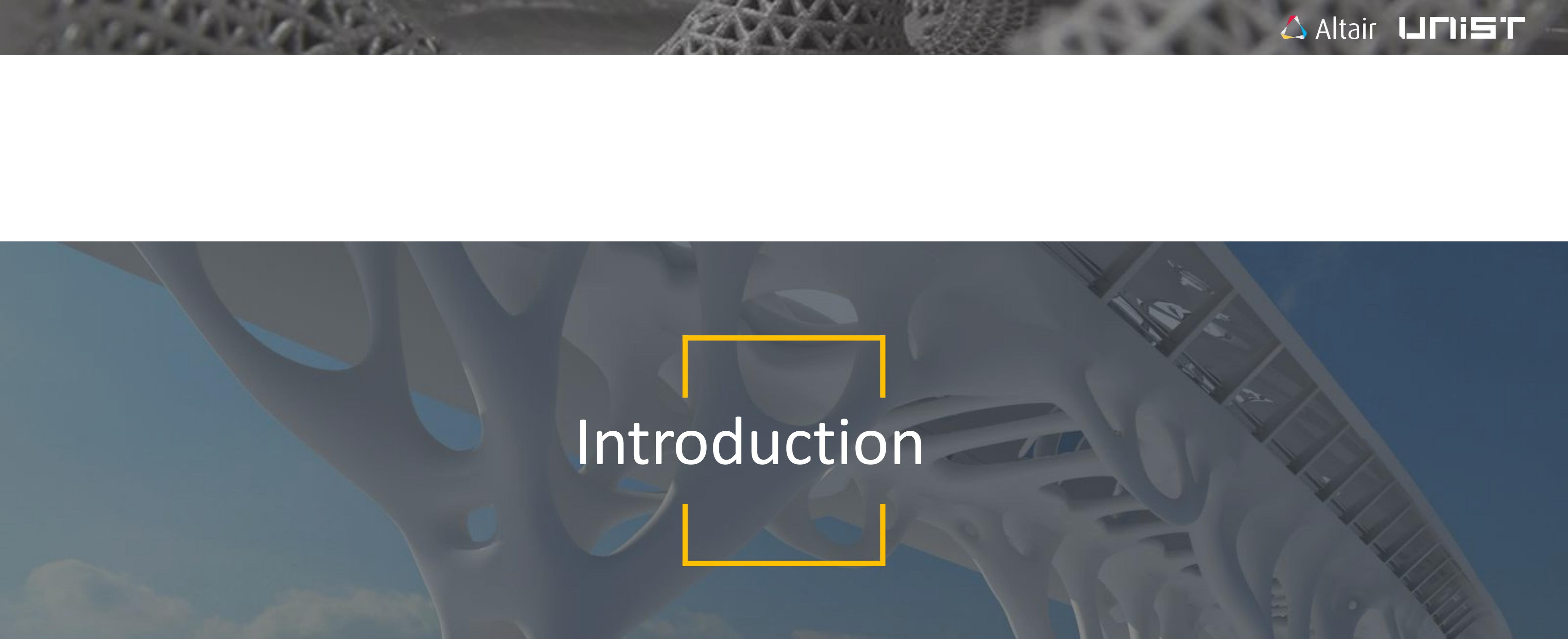
- Ergonomic approach
- Experimental approach
- 1st Design space
 - Load case 1 (static loads)
 - Load case 2 (collision)
 - Support and contact

3. Design actualization

- 1st Optimization
- 2nd Design space
- 2nd Optimization
- Final frame design
- Battery design
- Non-T.O design

4. Analysis and validation

- Structure analysis
- Natural frequency analysis
- Manufacturing analysis
- Final model



Introduction

Scooter concept

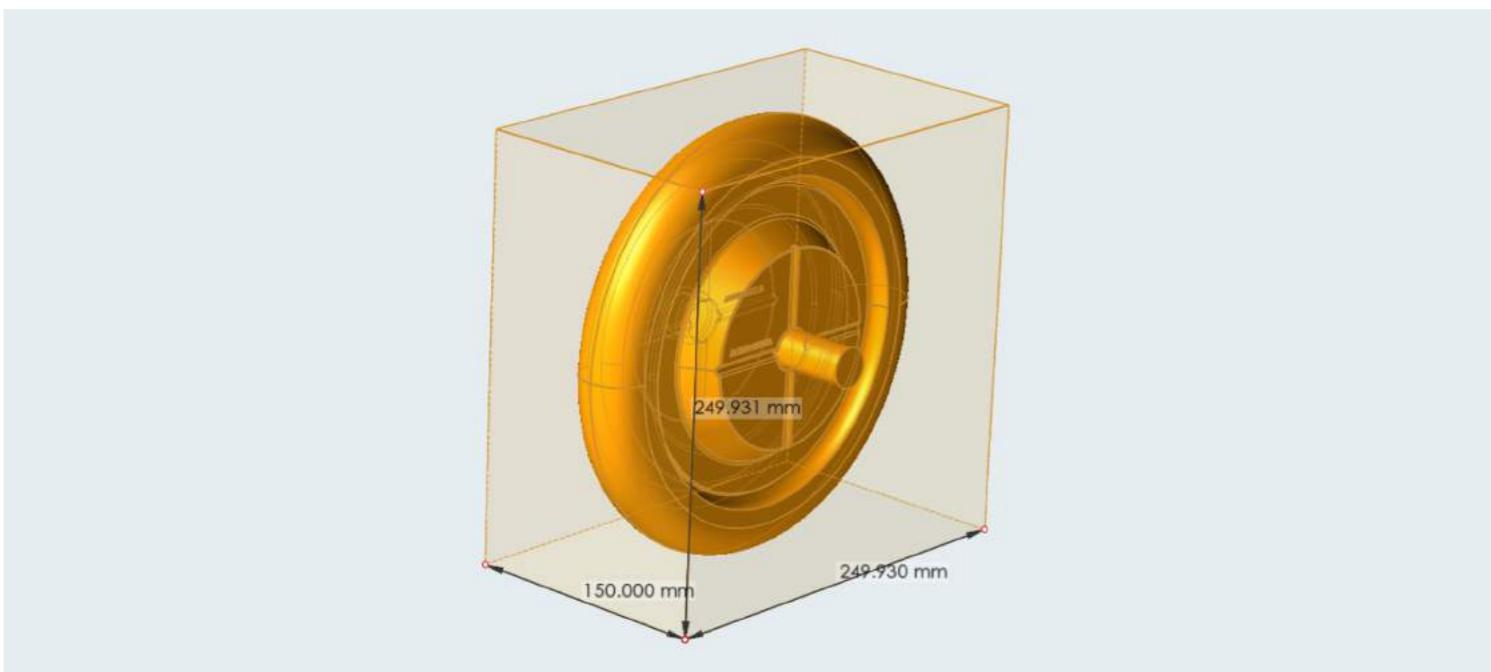
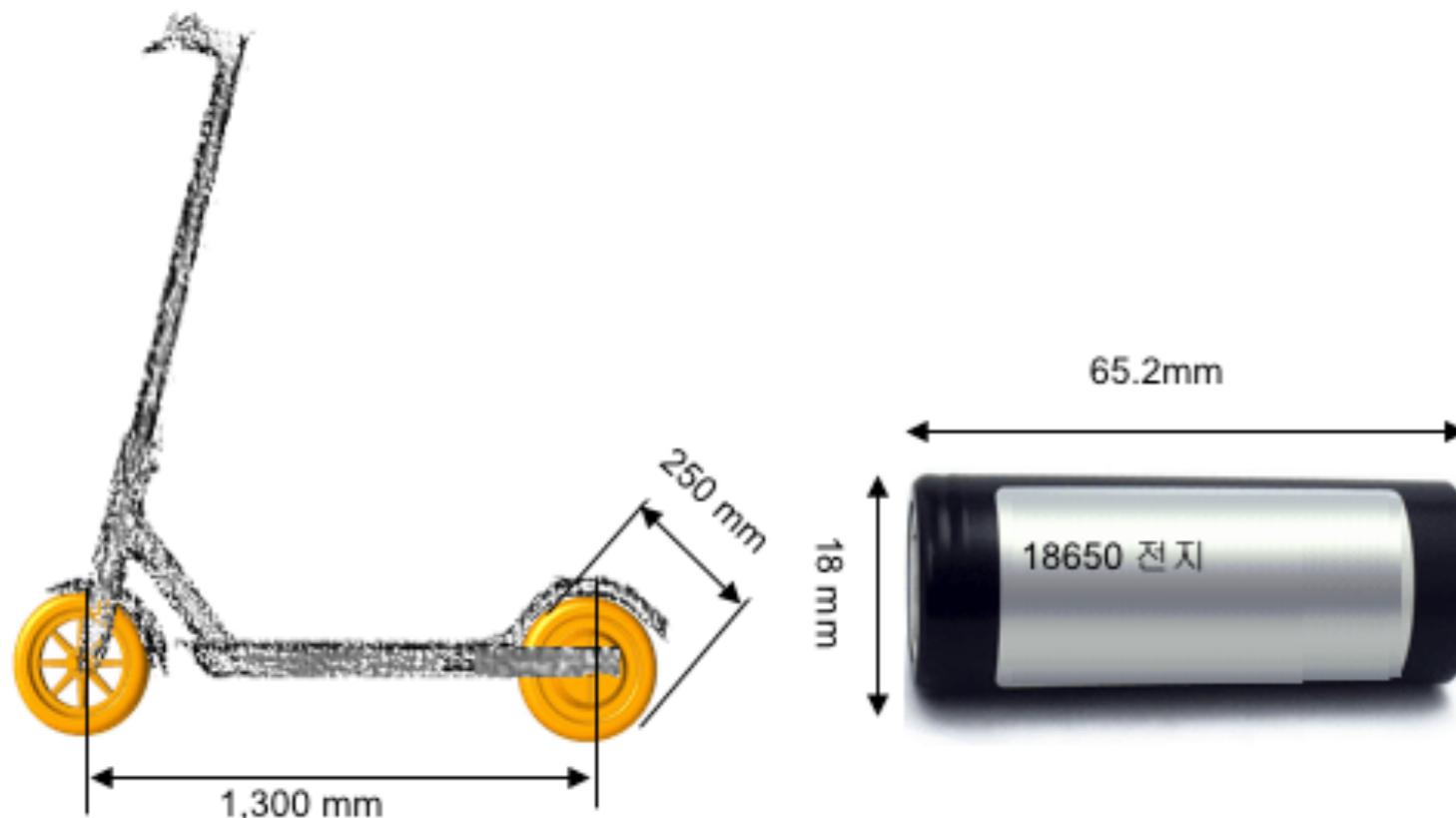
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 도심의 사람들이 출근길 또는 이동수단으로서 편하게 앉아서 타는 스쿠터 타입.
- 위상 최적화를 통해 기존의 앉아서 타는 무거운 스쿠터의 이미지를 벗어나 구조적으로도 안정적이고 경량화까지 된 스쿠터.
- 인간공학적인 최적화를 통해 편한 자세로 탑으로써 근육의 피로를 줄임.

Required spec

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 80kg의 성인이 탔을 때 지탱 가능하여야 한다.
- 18650 타입의 건전지가 사용되며, 최소 30개 이상을 사용해야 한다.
- 훨은 왼쪽 사진과 동일한 것을 사용해야한다.
- 종류의 제약은 없으며, 단 전동 스쿠터에 사용되는 모터는 훨 내부에 장착이 되는 것으로 가정한다.
- 스틸이나 알루미늄을 사용하여 제작해야 한다.

스틸 : 영률(210E+09 N/m²), 포아송비(0.3), 밀도(7,900 kg/m³), 항복강도(380E+6 N/m²)

알루미늄 : 영률(69E+09 N/m²), 포아송비(0.3), 밀도(2,700 kg/m³), 항복강도(250E+6 N/m²)

Existing scooter spec

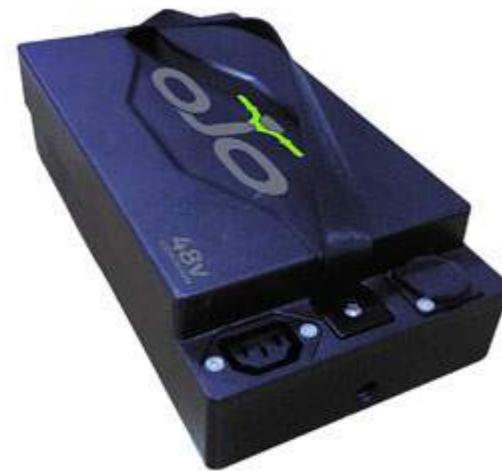
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 제품명 – Classic OJO
- 제조사 – OJO electronic
- 최고 속도 – 20mph (32kph)
- 무게 – 29.5kg
- 선정 이유 – 비슷한 휠 베이스와 배터리를 사용하고 컨셉으로 선정한 도심 속 출퇴근 용으로 적합하기 때문에.

Existing scooter spec

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



Battery

Li-ion battery pack

48 VDC at max charge



Motor

Patented 500 watt Hyper Gear hub motor

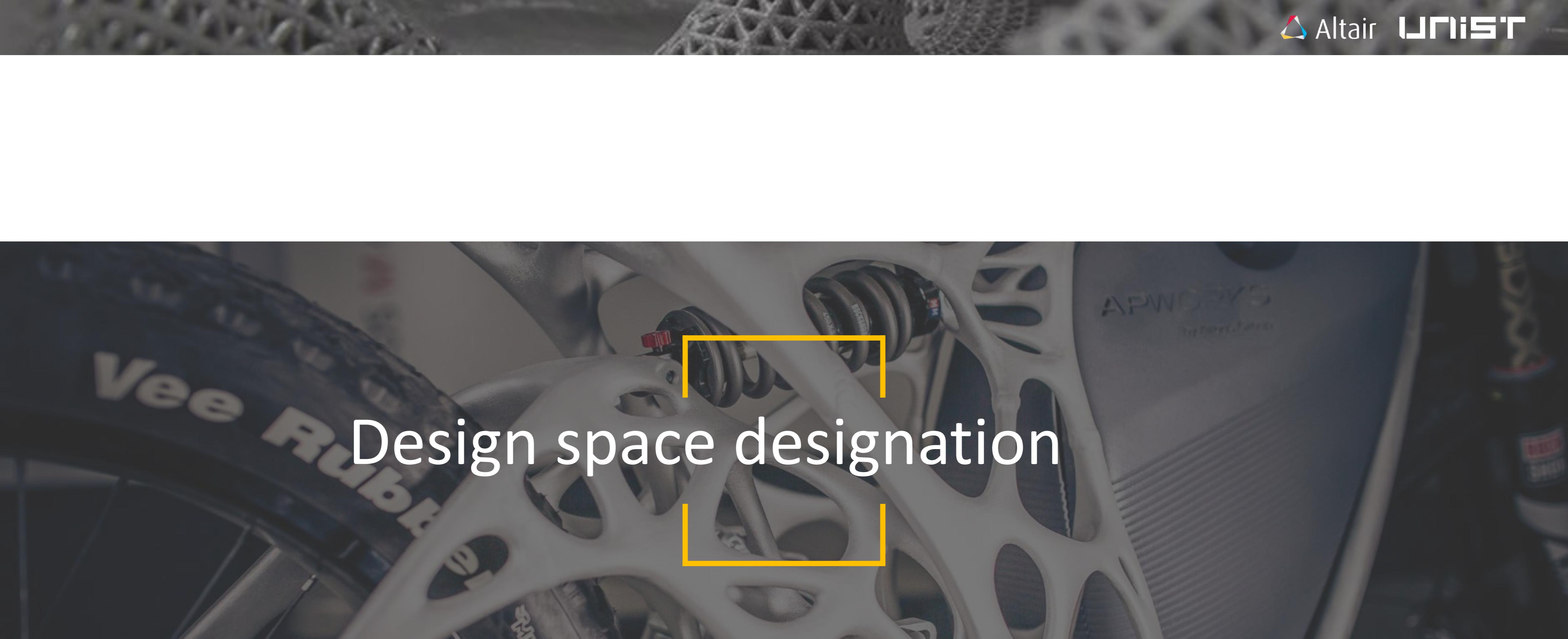


Structural

Frame - Welded aluminum frame

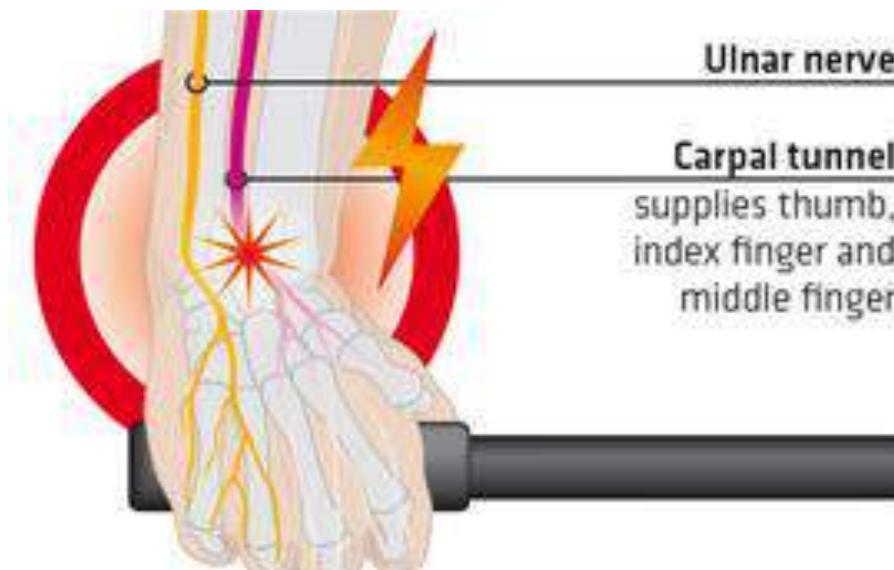
Carry capacity – 300lbs(136kg)

Wheelbase – 45inches(1143mm)

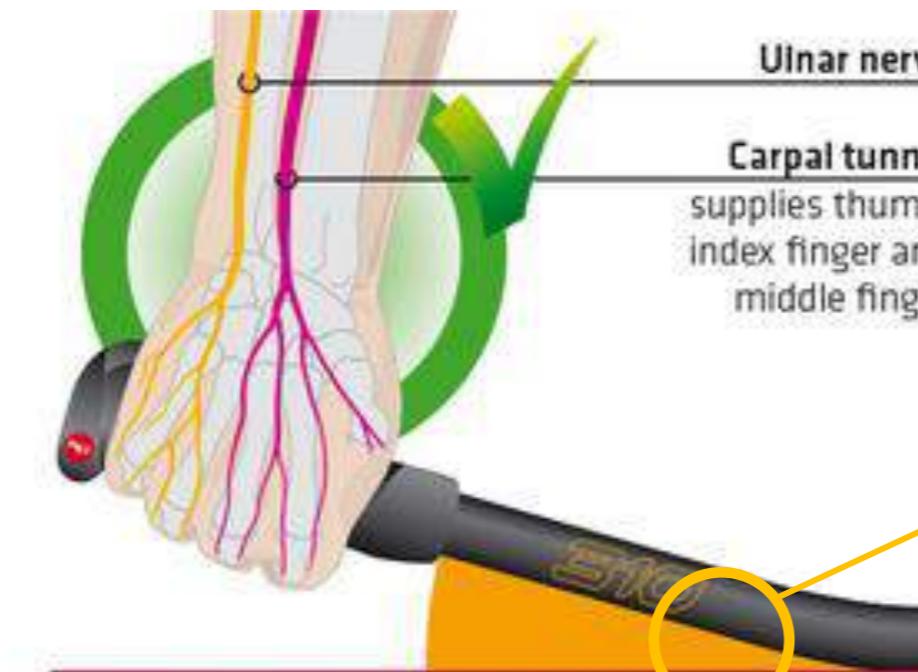


Ergonomic approach

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



Conventional straight handlebar
Carpal tunnel is constricted.
result → numb and sleepy fingers



SQLab handlebar
with an ergonomic backward bend.
Result → carpal tunnel is not constricted

Back sweep
센터에서부터 몸 쪽으로 핸들이 꺾인 각도

TREKKING



- 기존의 일자형 핸들은 사용자의 손목의 Carpal tunnel을 수축시킨다.
- 손목에 통증이 가지 않으려면 Back sweep 필요.
- 도심 속 편하게 타는 전동 스쿠터의 경우 가장 이상적인 Back sweep은 45도이다.

자료 출처 : sports ergonomics SQ lab, (<https://www.sqlab.com/en/sqlab-ergonomics>)

Experimental approach

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

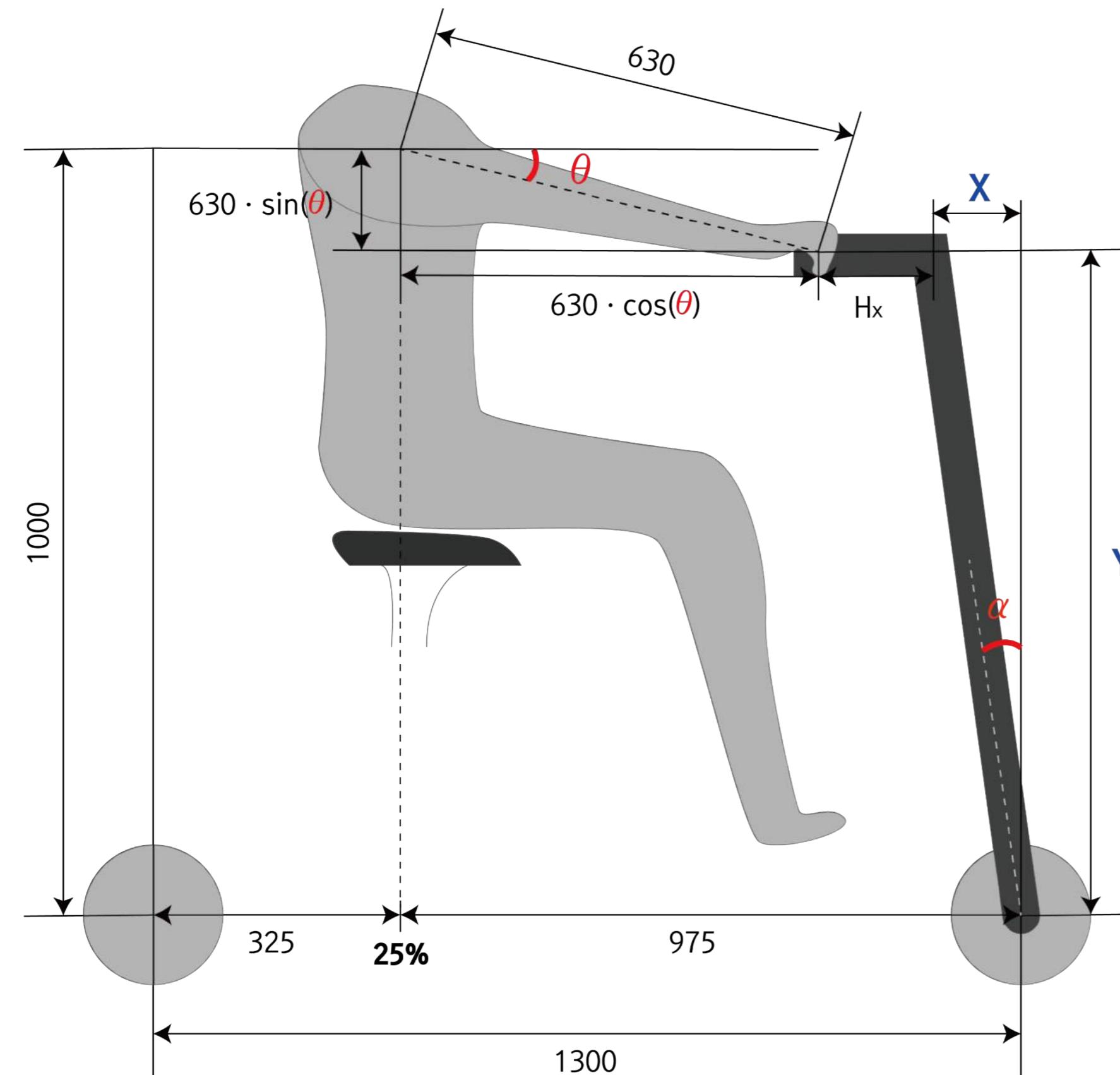


1년 전 SLS 프린터로 제작하였던 전동 자전거 'Unike'

- 1년 전 전동 자전거 최적화 과정을 거쳐 제작해본 경험.
- 모터가 뒷바퀴에 있을 시 counter torque 발생.
- 모터가 뒤에 있고 안장의 축이 뒤쪽으로 치우쳐져 있으면 정지상태에서 급출발을 할 경우 앞바퀴가 들리는 현상이 나타남.

1st Design space

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



인간공학적과 경험적인 접근을 통해 성인남성 기준으로 측정함.

사용자의 팔길이	630mm
안장의 축	Front wheel의 중심을 기준으로 3/4 지점
Hx(핸들바의 x축 길이)	80mm
θ (사용자의 팔 각도)	18 ° (핸들을 잡고 있기 편안한 팔 각도)
X	Front fork의 x축 길이
Y	Front fork의 z축 길이
α	Front fork의 각도

$$X = 1300 \cdot \frac{3}{4} - 630 \cdot \cos(\theta) - Hx = 295.84\text{mm}$$

$$Y = 1000 - 630 \cdot \sin(\theta) = 805.32\text{mm}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(X/Y) = 20.17^\circ \doteq 20^\circ$$

1st Design space

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

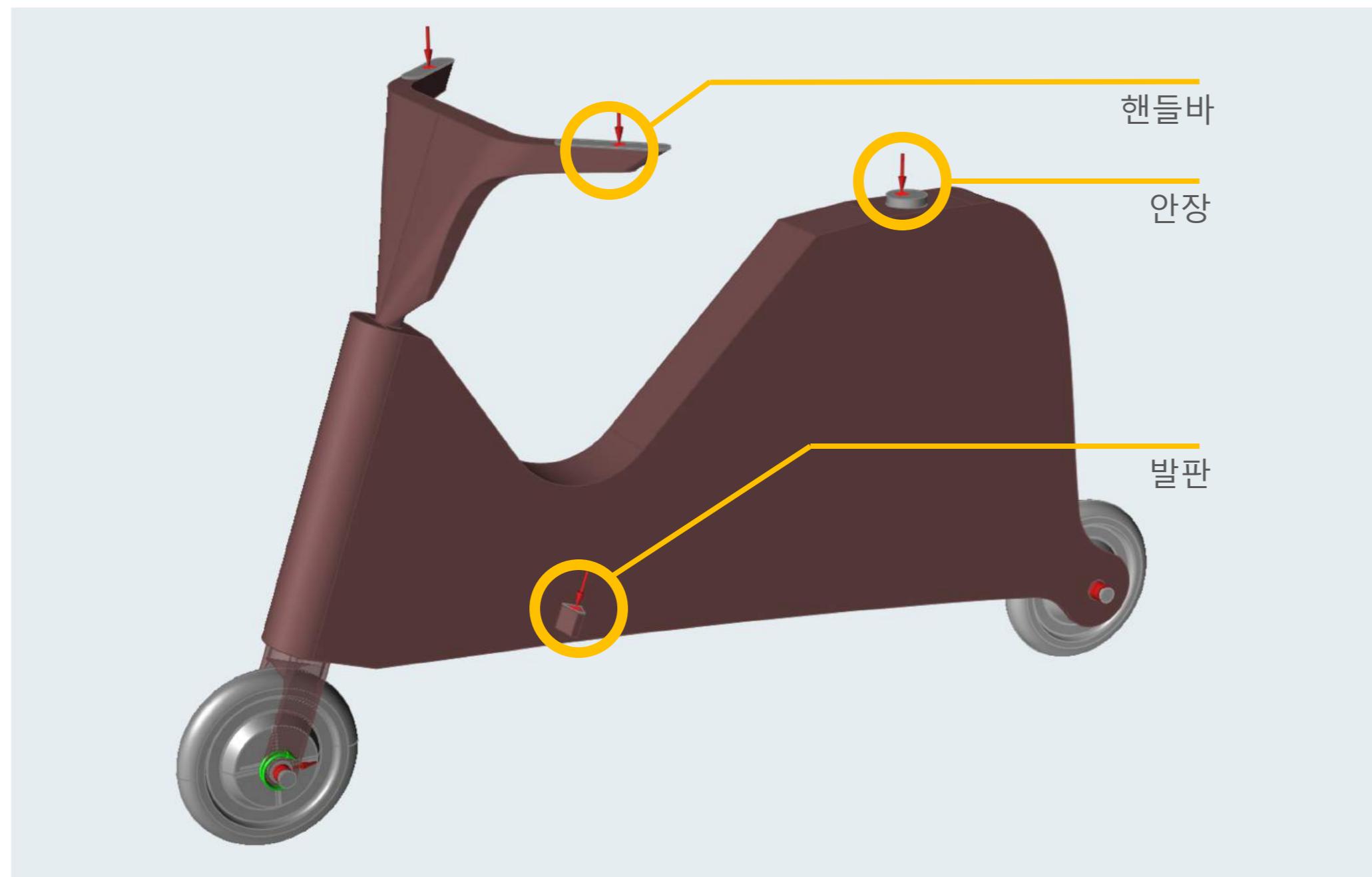


1st design space

- 중량 - **143.2kg**
- 앞서 설명했던 여러가지 접근을 통하여 사용자로 하여금 편한 자세로 탈 수 있도록 설계한 디자인.
- 크게 body와 front fork로 나뉘어져 있고 두 파트는 2개의 파이프로 이어져 있다.

Load case 1 (Static loads)

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



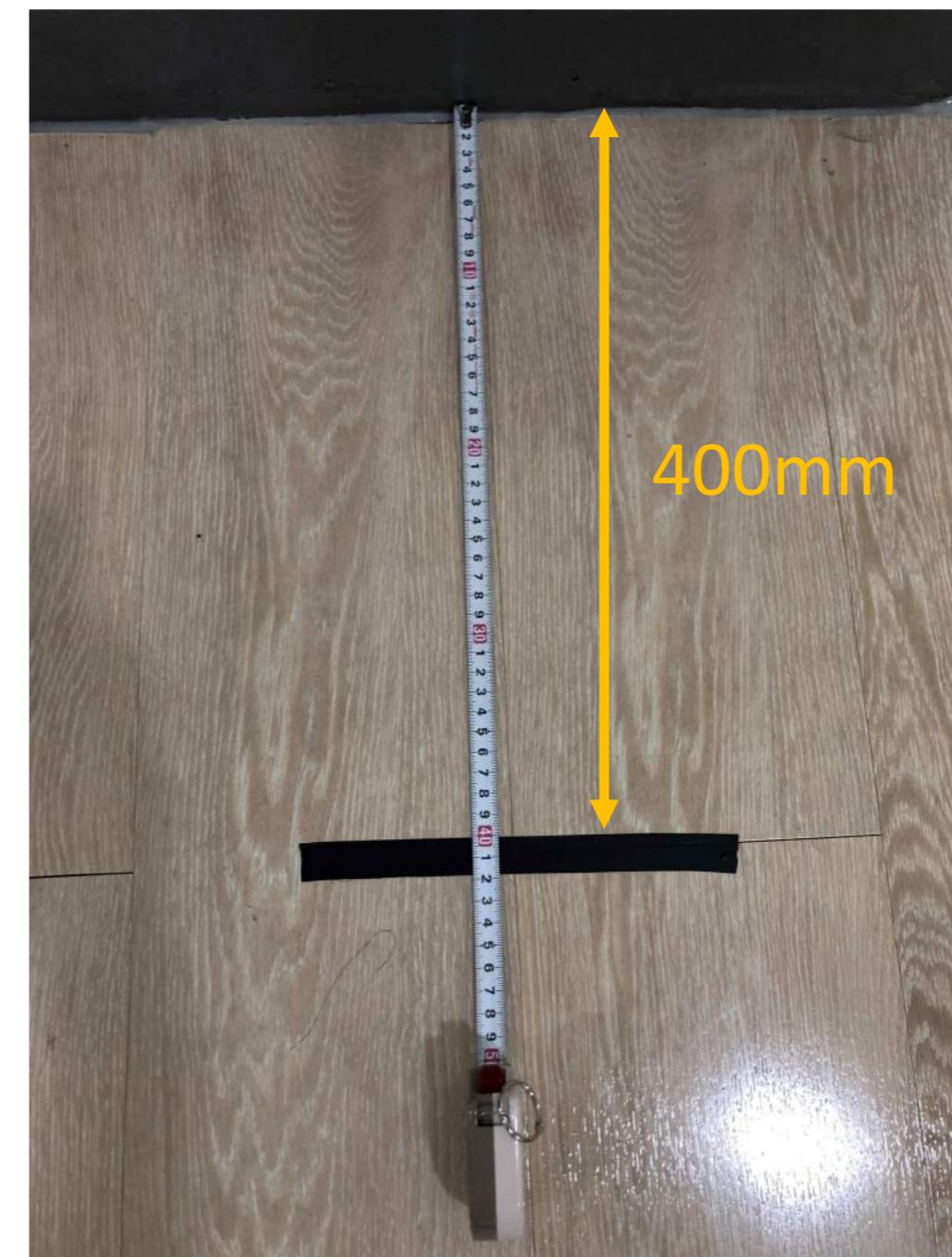
- 성인남성 기준으로 핸들바, 안장, 그리고 발판 총 세 부분에 각 면에 수직 방향으로 하중을 적용함.

| 하중 적용

핸들바	147N[15kg · 9.8%], (좌, 우 한쪽에 73.5N씩)
안장	784N[80kg · 9.8%]
발판	147N[15kg · 9.8%], (좌, 우 한쪽에 73.5N씩)

Load case 2 (collision)

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 실제 스쿠터를 타고 부딪혔을 때 어느 정도의 충격을 받는지 직접 실험을 해보았다.

실험 조건

기준 거리	400mm
피실험자 무게	90kg
스쿠터 무게	9kg

Load case 2 (collision)

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



<충돌 실험 영상>

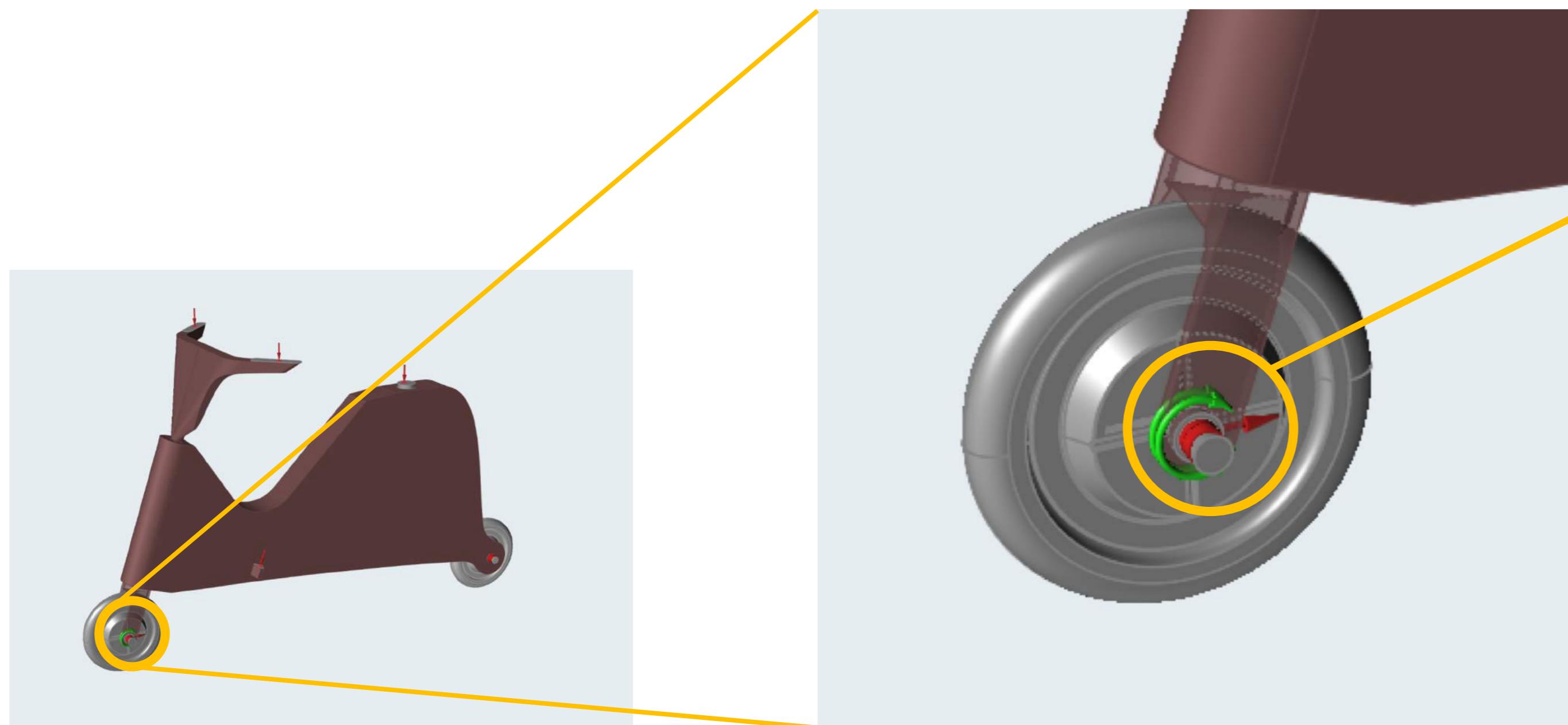
실험 결과 (동영상 판독)

무게	성인남성 90kg + 스쿠터 9kg = 99kg
기준거리 주파시간	0.15sec(5.68 ~ 5.83)
충돌 시간	0.81sec(5.83 ~ 6.64 - 탑승자가 완전히 정지할 때까지)
속도	400mm/0.15sec = 2.667%
운동량	$99kg \cdot 2.667\% = 264.00kg \cdot \frac{m}{s}$
충격량	$264.00kg \cdot \frac{m}{s} \div 0.81sec = 325.93kg \cdot \frac{m^2}{s^2} = 325.93N$

전면부에 충돌 시 가해지는 힘 = **325.93N**

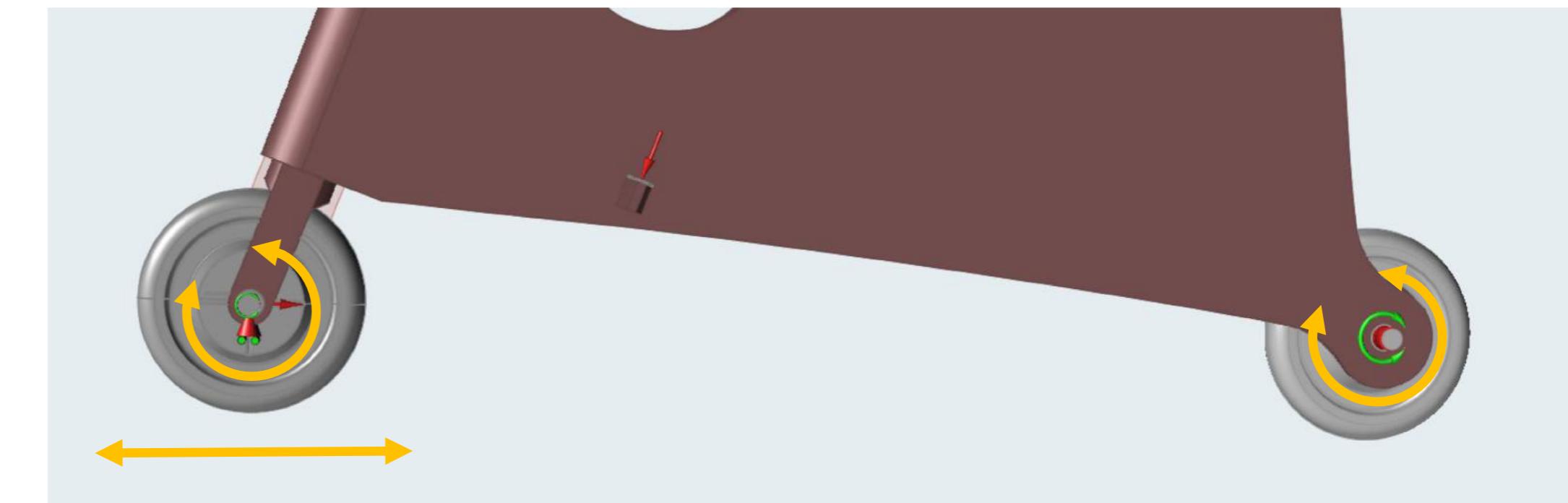
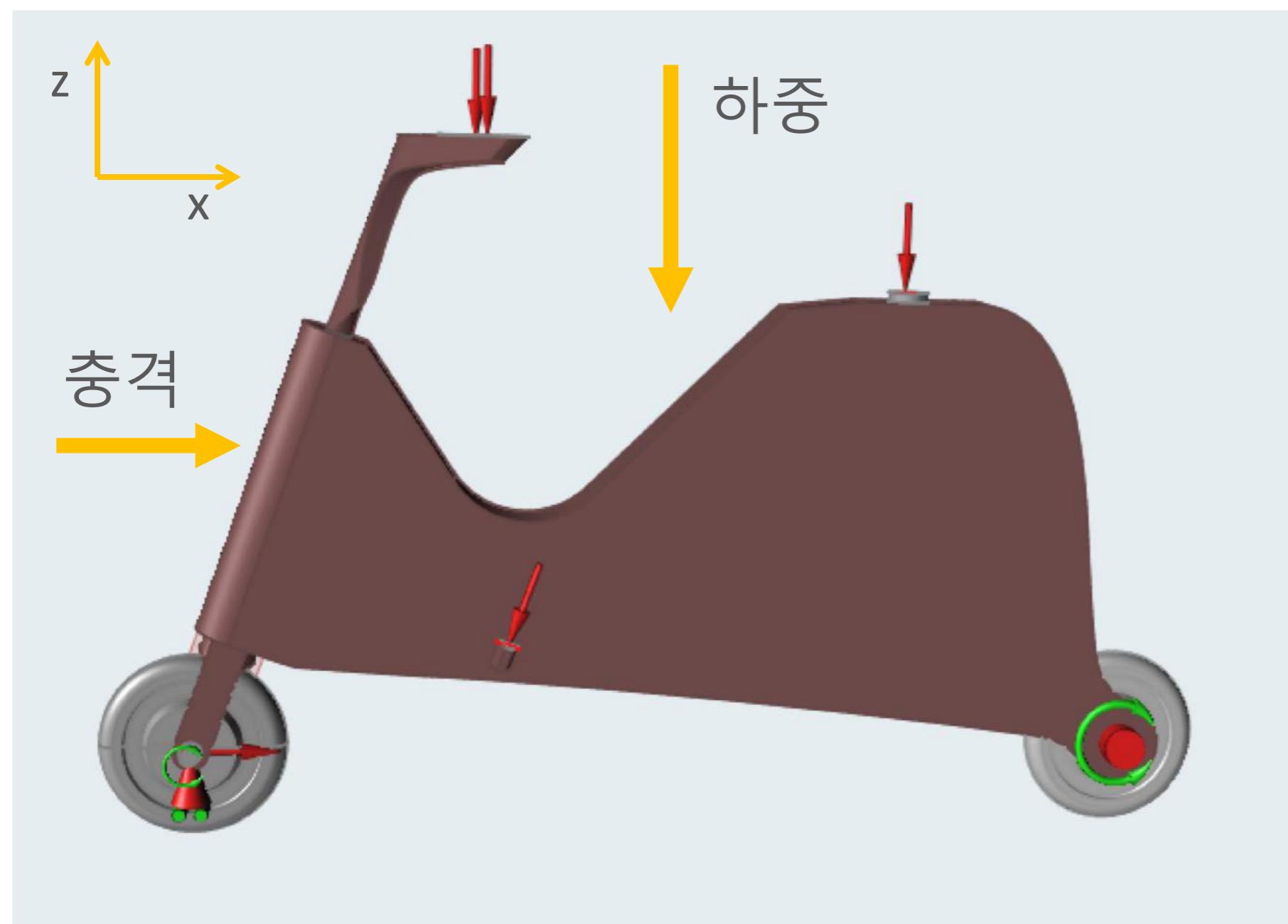
Load case 2 (collision)

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



Contact and Support

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



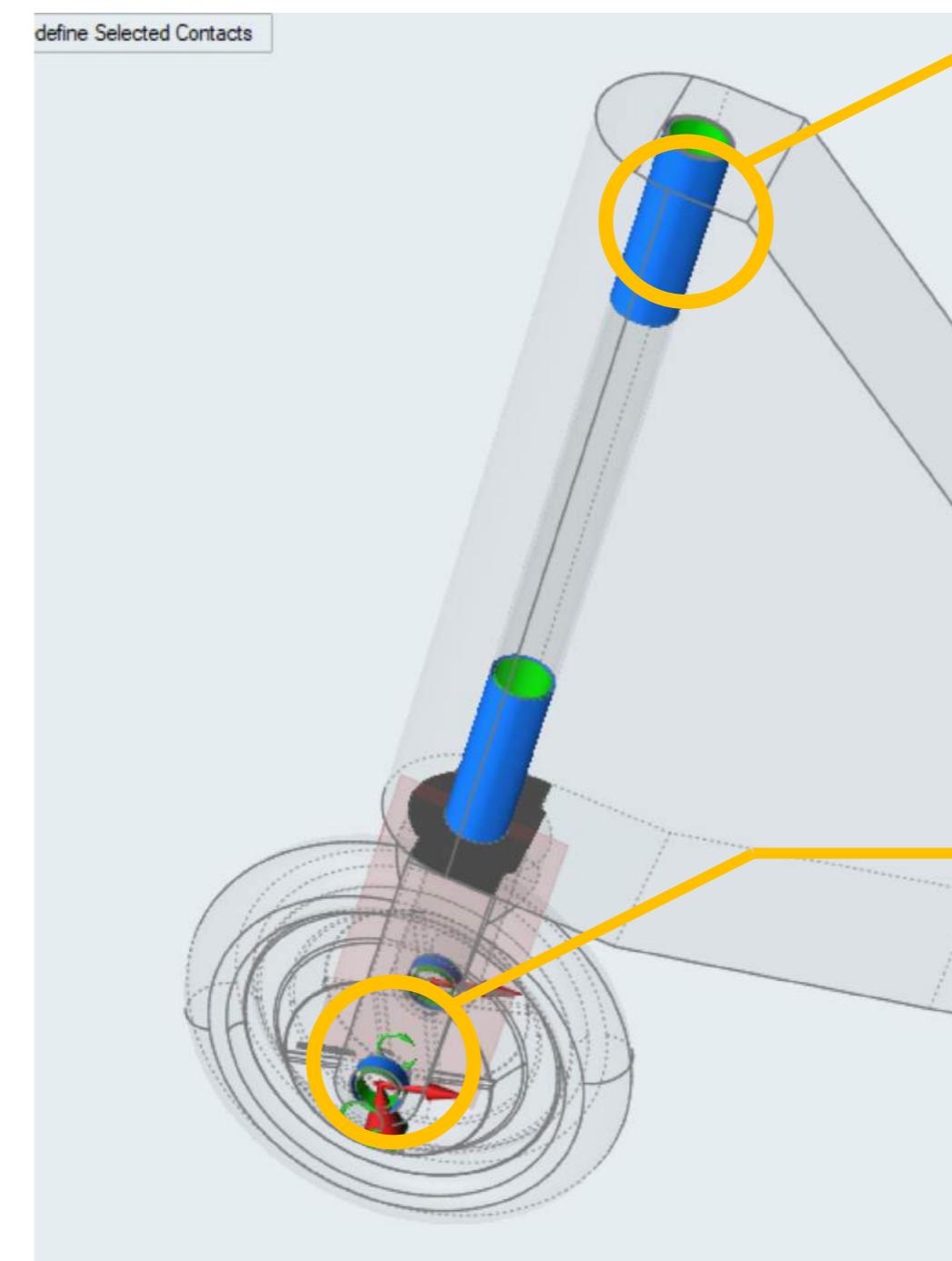
- 간략하게 정리해서 body와 front fork에 작용되는 힘은 z축 방향의 하중과 x축 방향의 충격이 있다.
- 앞바퀴에 가해지는 충격이 뒤로 전달되어야 한다.

Applied Support

Support part	가능한 x,y,z 방향 움직임	회전 가능성
앞바퀴 cap	x축 방향	가능
뒷바퀴 cap	모든 축 방향 불가능	가능

Contact and Support

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



Inner pipe cap contact condition

- Inner – contact with front fork rod
- Outer – bonded with body

Wheel cap contact condition

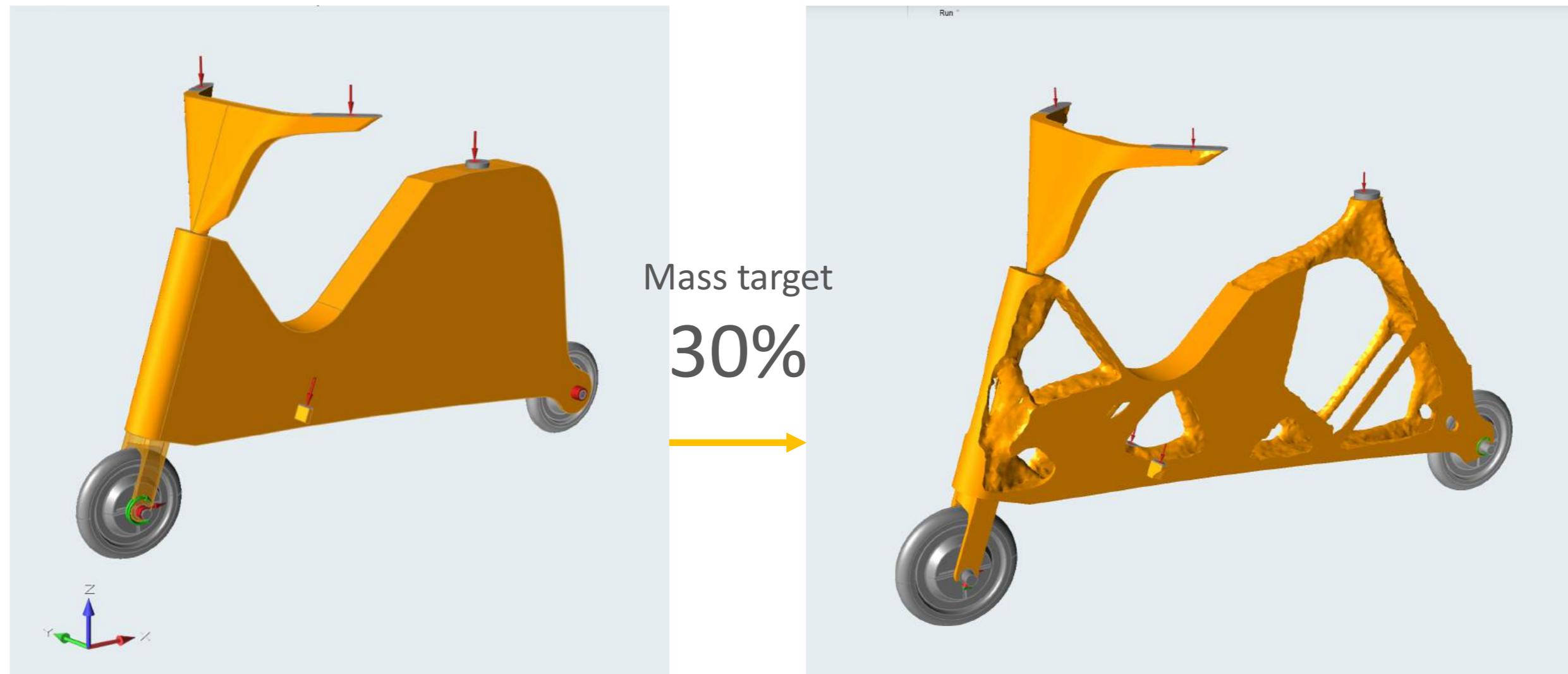
- Inner – contact with wheel rod
- Outer – bonded with body



Design actualization

1st Optimization

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



143.20kg → 41.54kg

질량 감소
71%

문제점

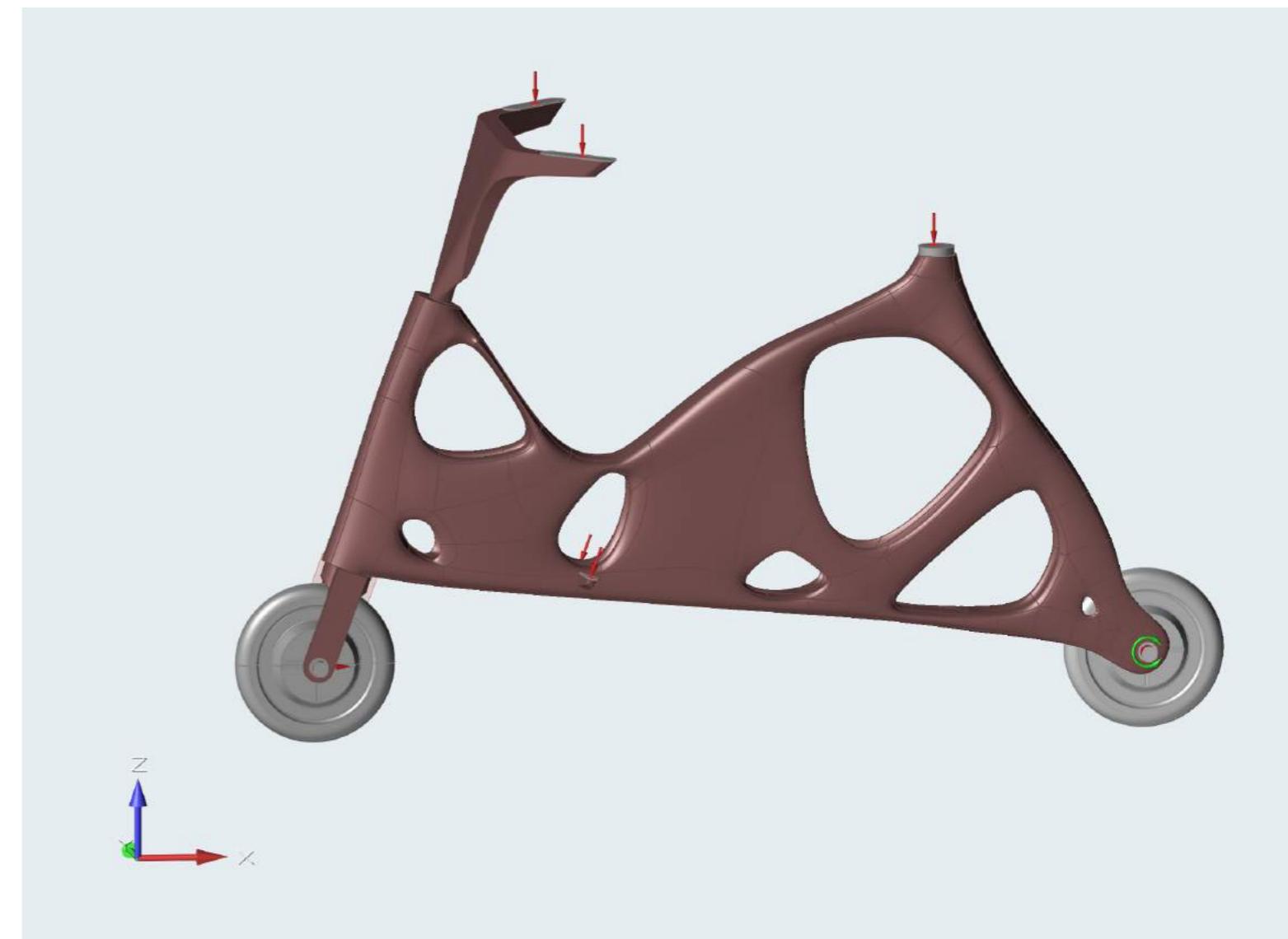
- 디자인 스페이스가 너무 커서 대부분의 최적화가 body part에만 이루어짐.
- Front fork part에도 최적화 필요.
- 기존의 전동 스쿠터보다 아직 무게가 더 무거움.

개선점

- 1차 최적화 결과를 바탕으로 polyNURBS 디자인.
- 재디자인을 토대로 ‘2차 최적화’ 필요.

2nd design space

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

PolyNURBS
→

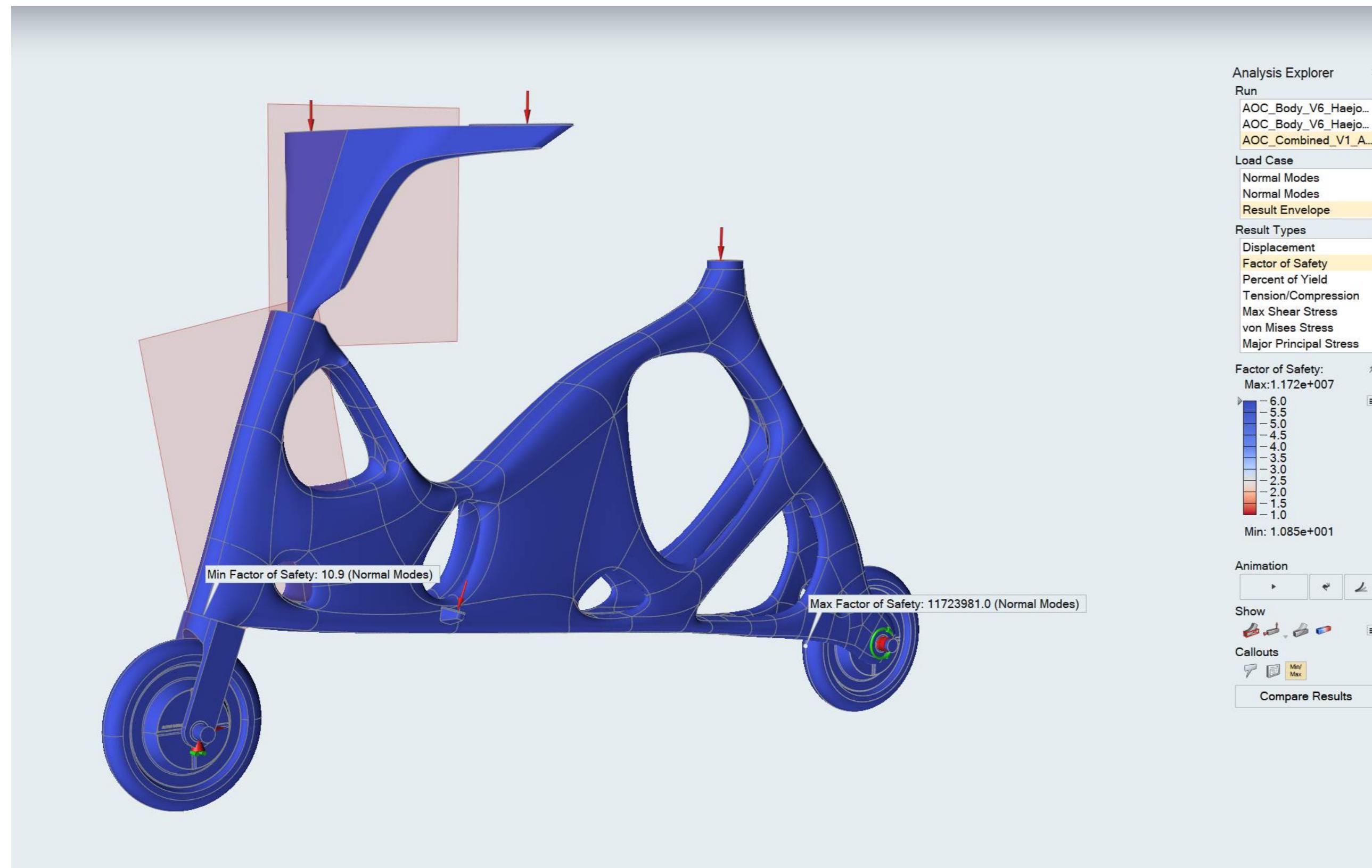
41.54kg

55.65kg

PolyNURBS 디자인 과정에서
질량 소폭 상승

2nd design space

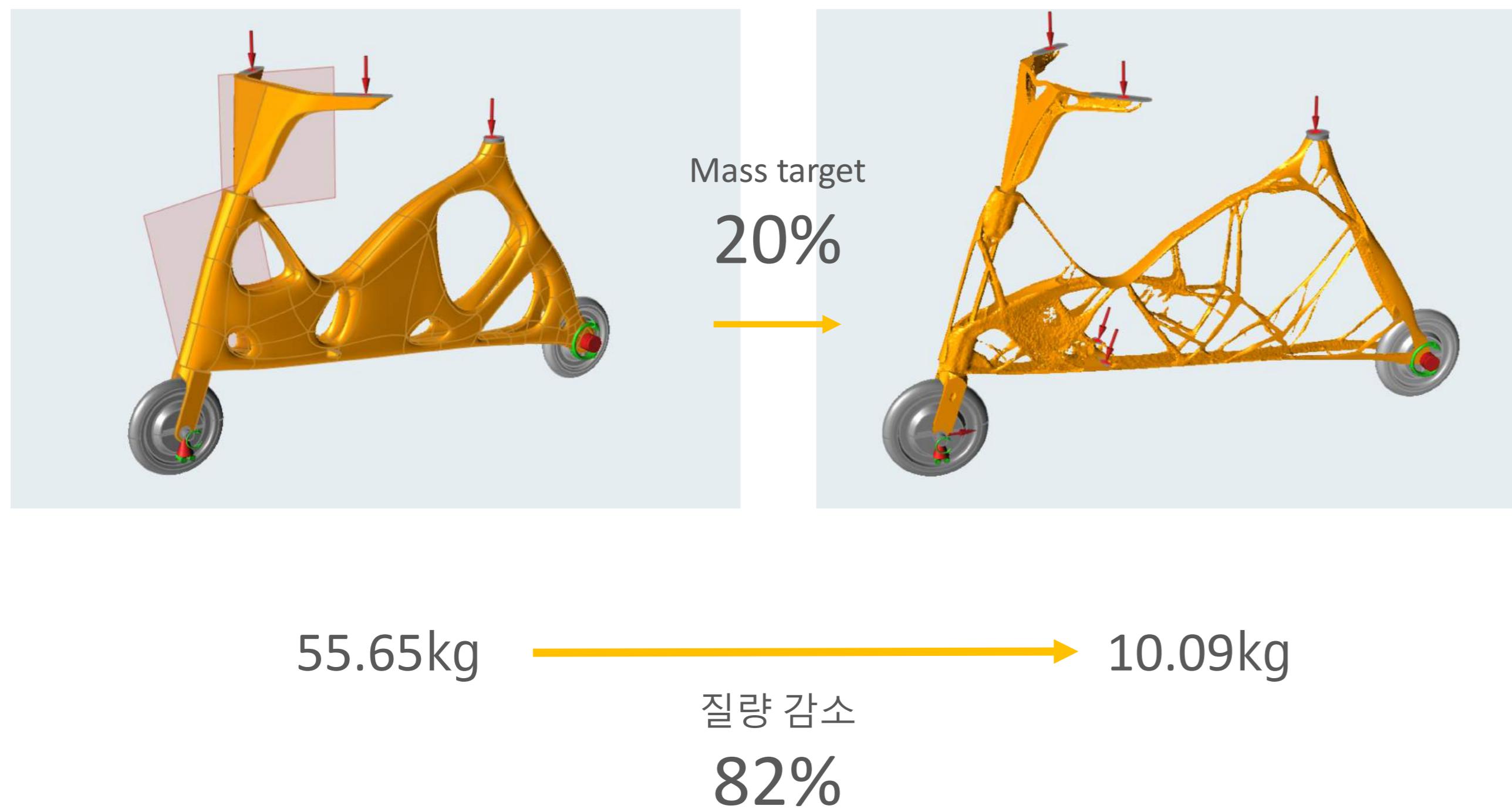
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

1st optimization 해석 결과

- 안전 계수(safety factor) – **10.9**
- 안전 계수가 over spec이 되어 해석되었기 때문에 구조적으로 전혀 문제가 없다고 판단.
- 추가 질량 경량화를 하기 위해 2nd design space 선정

2nd Optimization

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

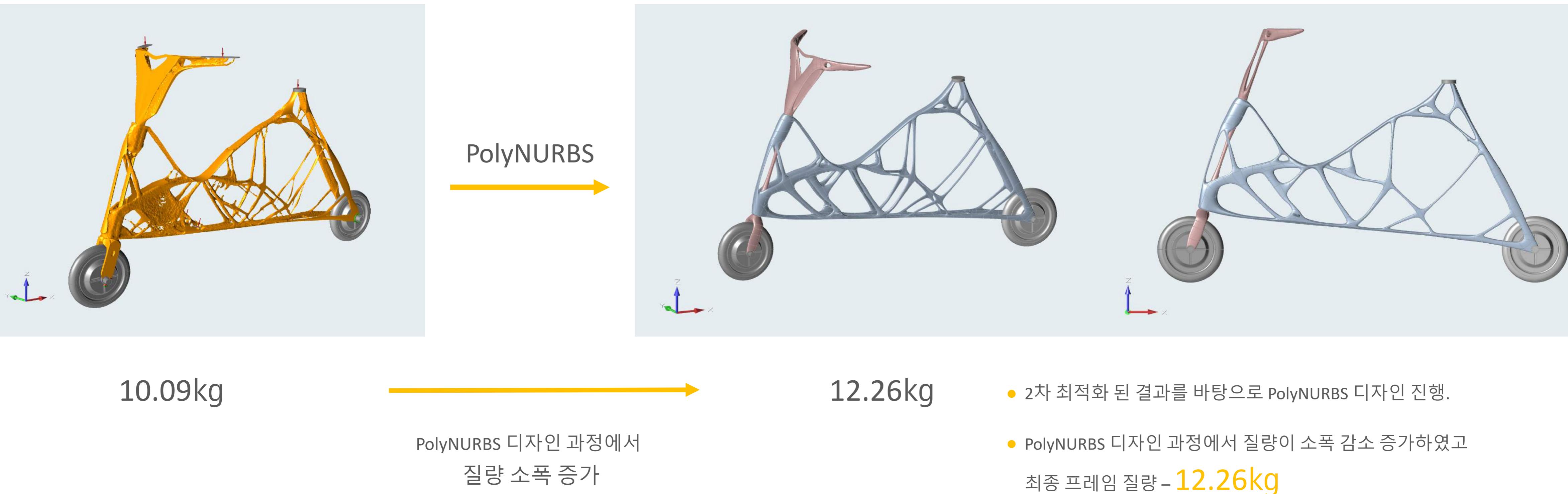


| 최적화 결과

- 2nd Design space의 안전 계수가 굉장히 높았기 때문에 1차 최적화 mass target인 30%보다 10%를 줄여 최적화 진행
- 최적화 결과 질량이 82%감소 하였고 목표의 질량을 만족 함으로 최종 디자인으로 선정

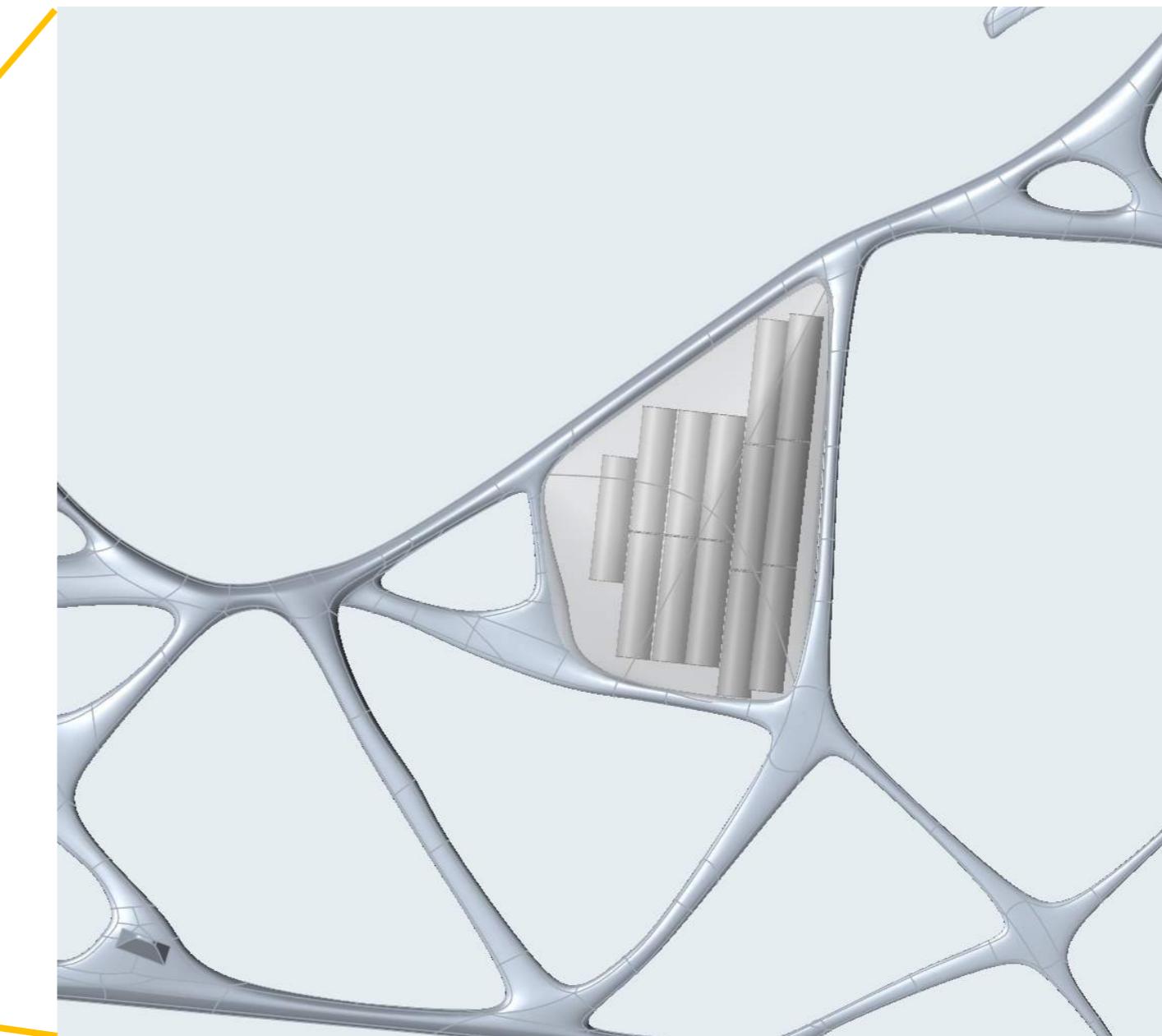
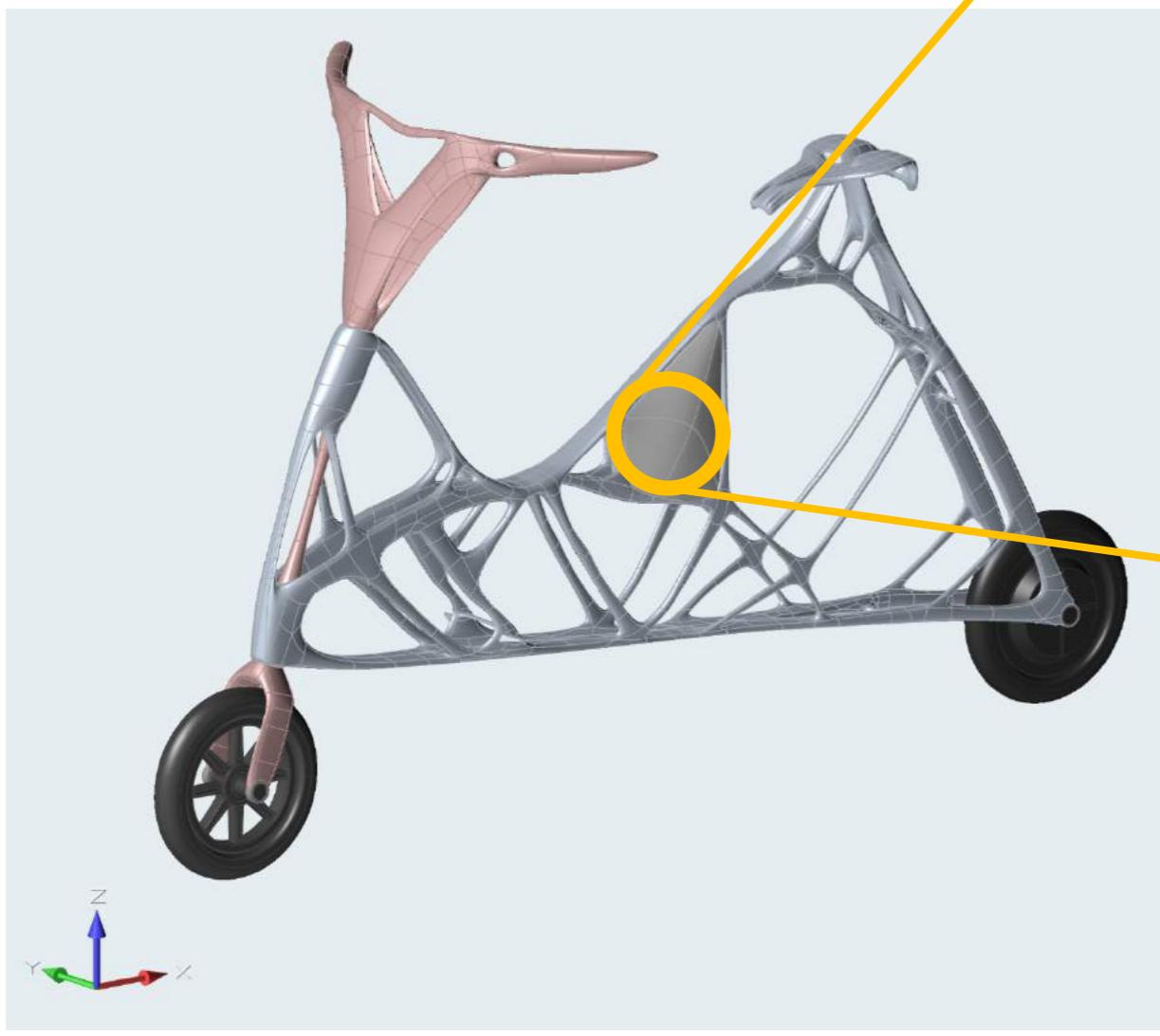
Final frame design

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



Battery design

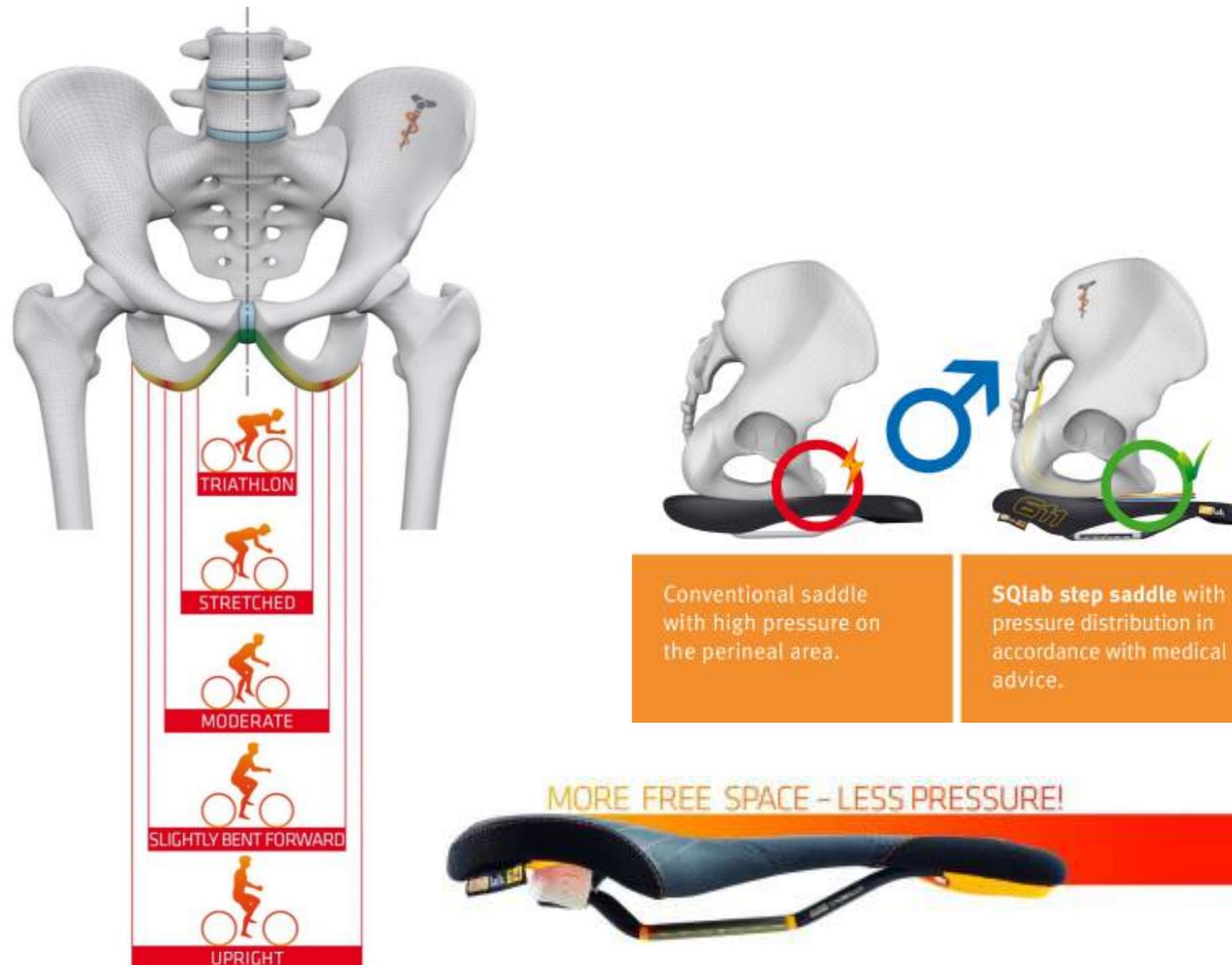
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 배터리의 위치는 무게 중심과 가까운 곳으로 배치
- 배터리의 위치는 구조적으로 안전한 곳으로 배치
- 배터리를 탈부착하기 편한 위치에 배치

Non-T.O design

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

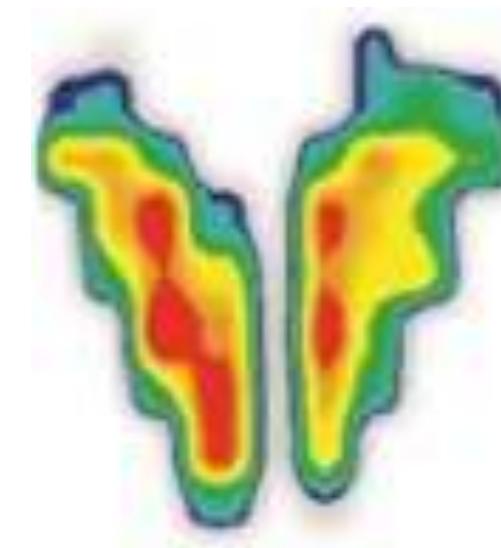


- 컨셉으로 설정하였던 도심 속 스쿠터에는 왼쪽 사진과 같이 허리를 꽂꼬이 세우는 UPRIGHT position이 적합하다.
- 허리의 각도가 90에 가까울수록 안장에 접촉하는 면적이 늘어난다.
- 안장에 접촉하는 부분은 엉덩이뼈(Seat bone)이라는 곳인데 안장을 우측면에서 봤을 때 안정의 높이가 수평이면 회음부(perineal area)가 안장에 닿게 되면서 계속해서 자극을 주게 되어 신경에 문제가 발생할 수 있다.
- 안장의 Seat bone이 닿는 부분 외에 공간을 만들어 자극을 줄여야 한다.

자료 출처 : sports ergonomics SQ lab, (<https://www.sqlab.com/en/sqlab-ergonomics>)

Non-T.O design

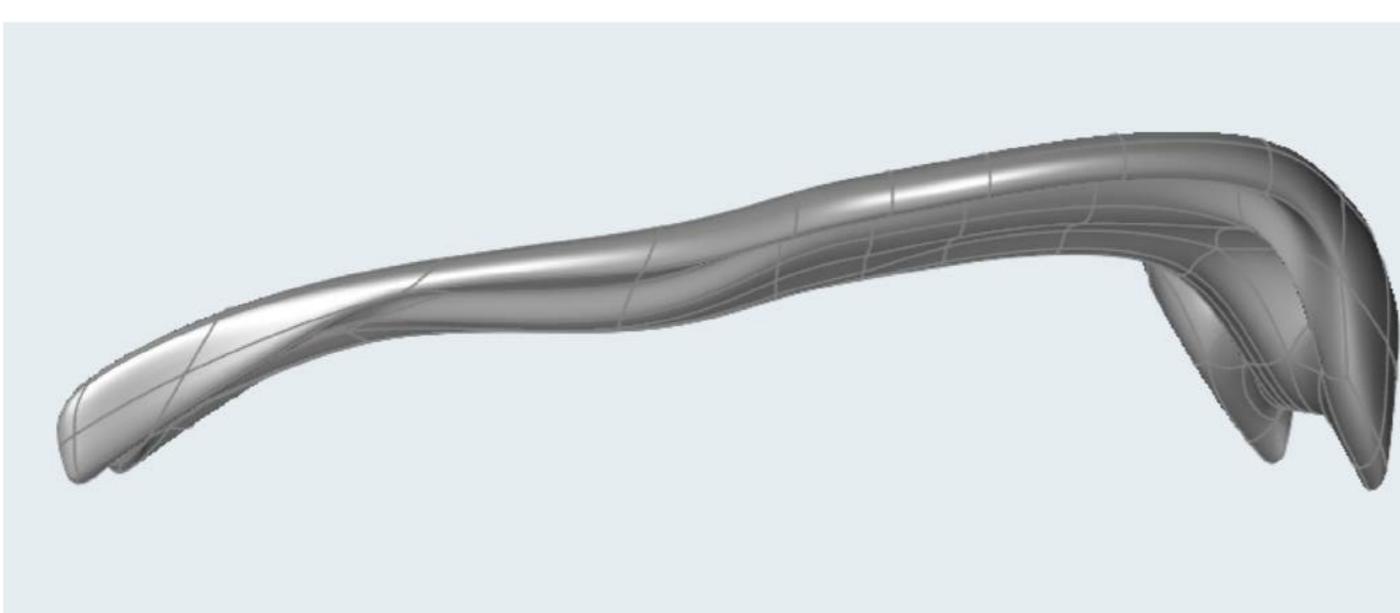
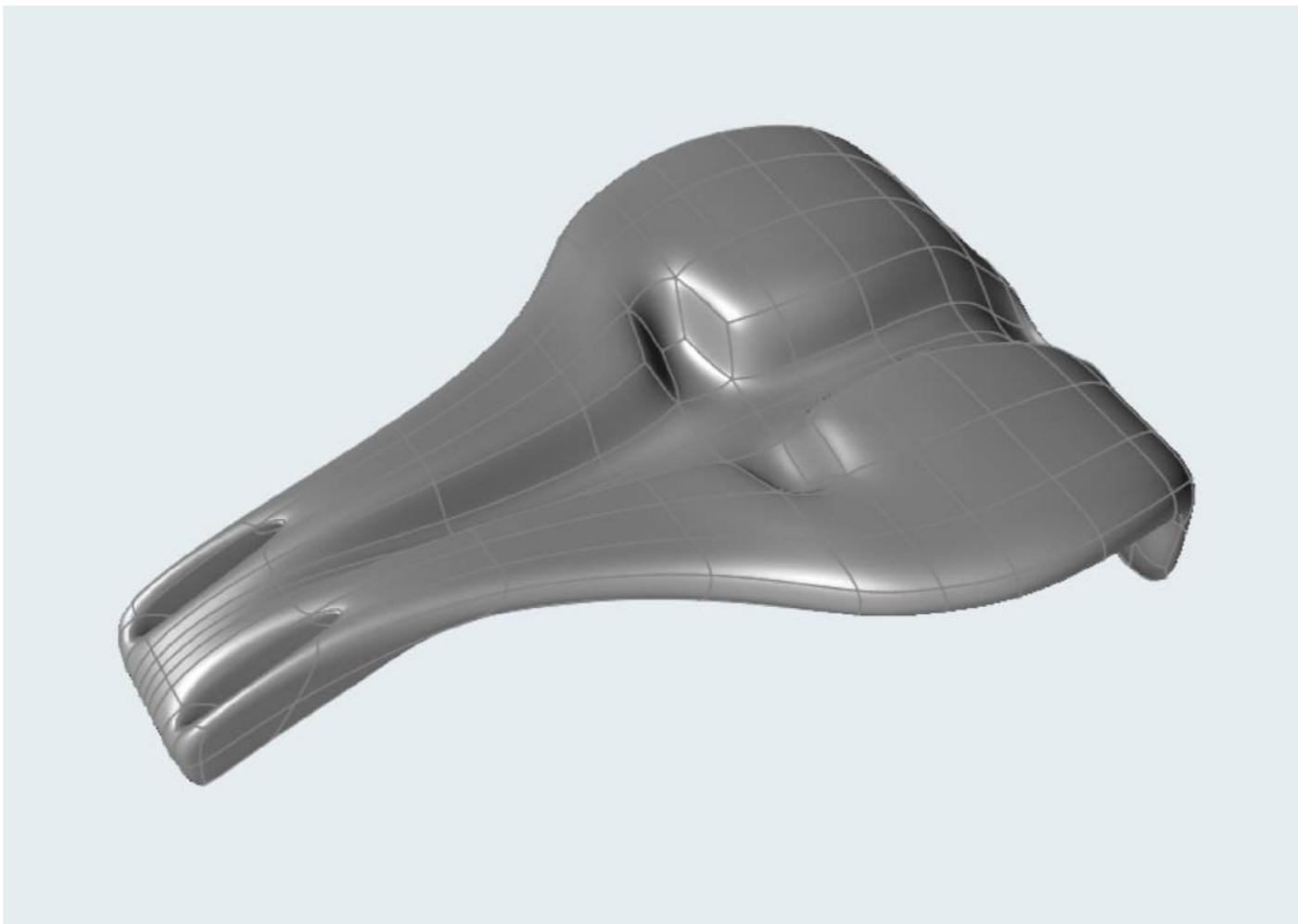
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- 회음부의 자극을 줄이기 위해 보통 안장의 가운데 부분이 웜푹 파임.
- 왼쪽 사진에서 확인할 수 있듯이 가운데 부분의 디자인에 따라 자극이 얼마나 골고루 분산되는지 알 수 있다.
- 가운데가 뚫린 디자인 → 자극이 회음부에 집중
- 가운데가 웜푹 패인 디자인 → 자극이 고르게 분산

자료 출처 : sports ergonomics SQ lab, (<https://www.sqlab.com/en/sqlab-ergonomics>)

Non-T.O design

[Introduction](#) [Design space designation](#) [Design actualization](#) [Analysis and validation](#)

- 성인 남성의 엉덩이뼈를 기준으로 안장이 넓어야 한다.
- 안장과 엉덩이뼈가 닿는 부분 외에 공간이 있어야 한다.
- 가운데를 움푹 패이게 디자인을 하되 뚫려 있으면 안된다.

안장은 위의 3가지 조건을 모두 충족시켜 디자인 함.

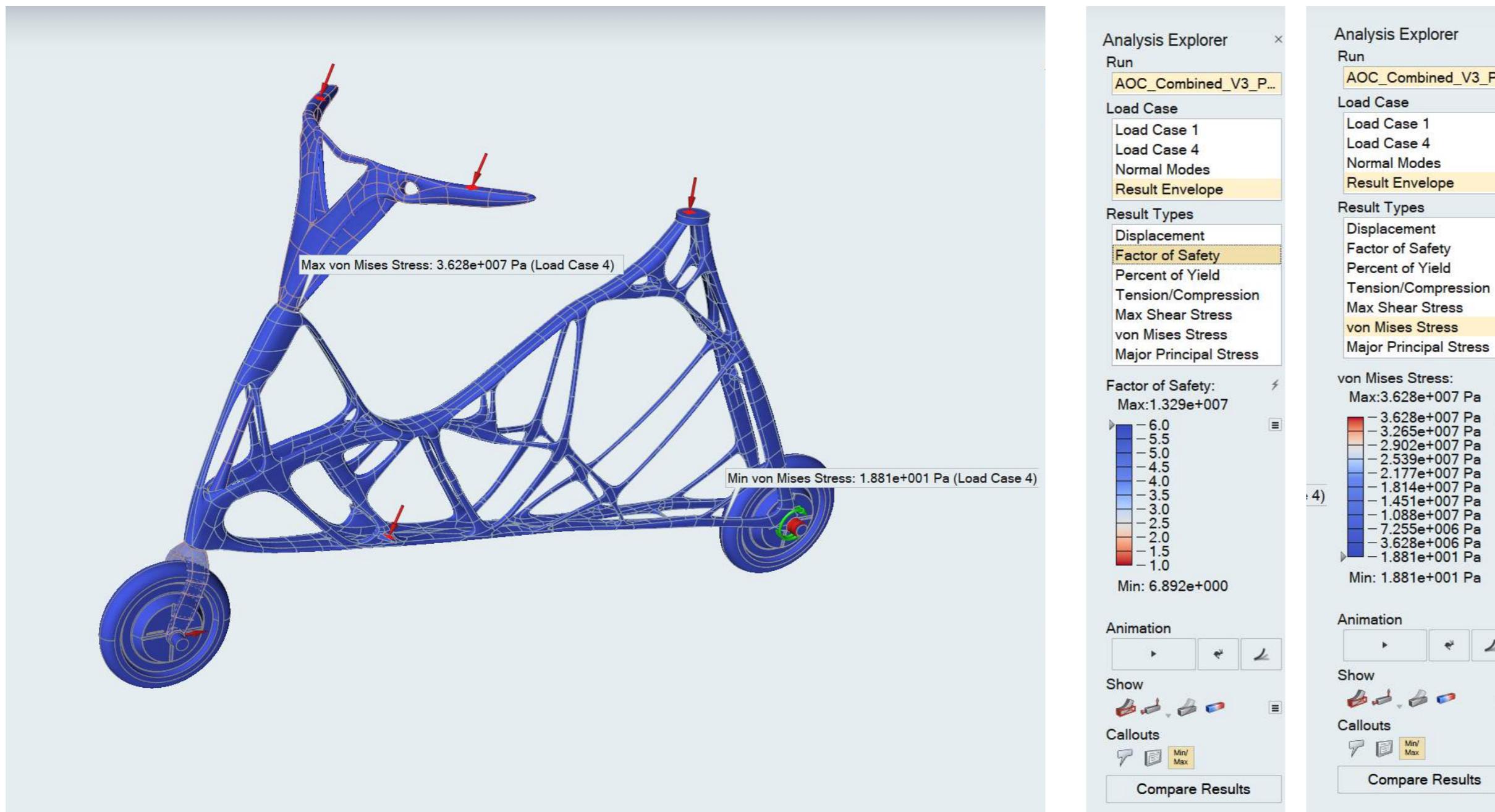
- 중량 - **0.62kg**



Analysis and validation

Structure analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



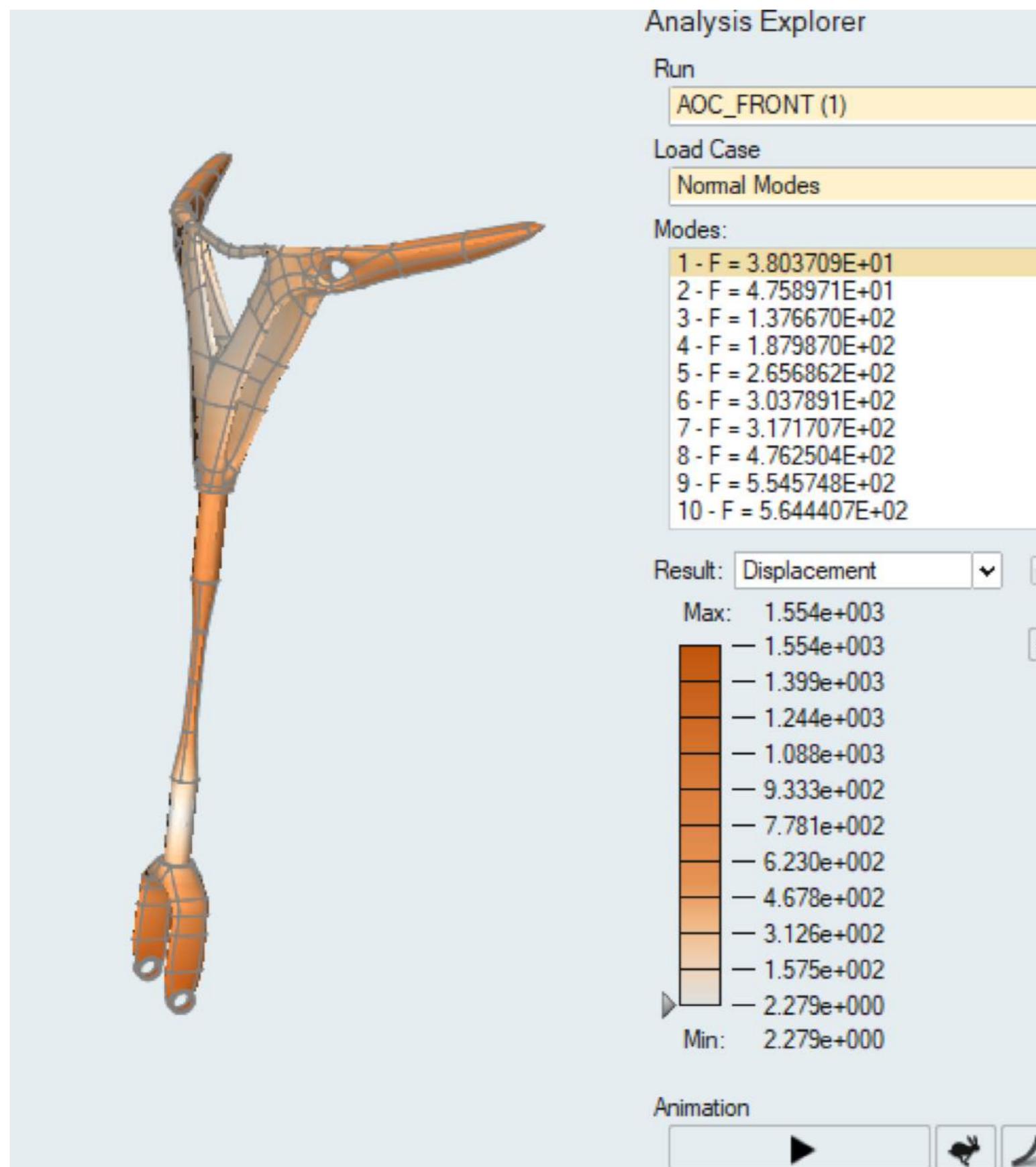
해석 결과

- 안전 계수가 3이상으로 충분히 안정적으로 판단.

Von-mises stress	36.2Mpa
Safety factor	6.8

Natural frequency analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

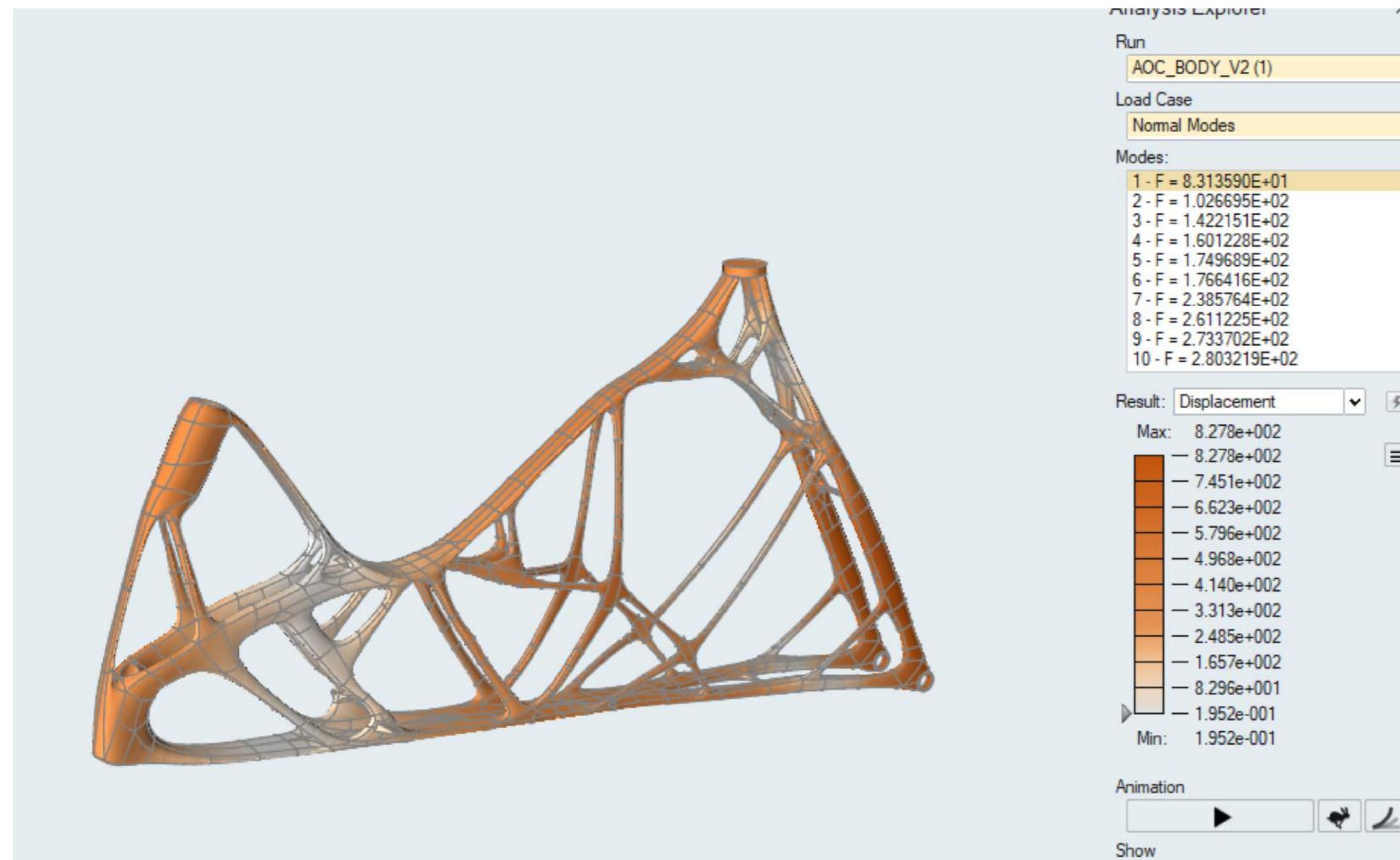


파트	Front fork
Mode 1	38.03hz
Mode 2	47.58hz
Mode 3	137.66hz

- Mode 10에서 가장 큰 변형이 일어나지만 모터의 진동수와 차이가 너무 크므로 무시한다고 가정.

Natural frequency analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



파 트	Body frame
Mode 1	83.13hz
Mode 2	102.66hz
Mode 3	142.21hz

- Mode 9에서 가장 큰 변형이 일어나지만 모터의 진동 수와 차이가 너무 크므로 무시한다고 가정.

Natural frequency analysis

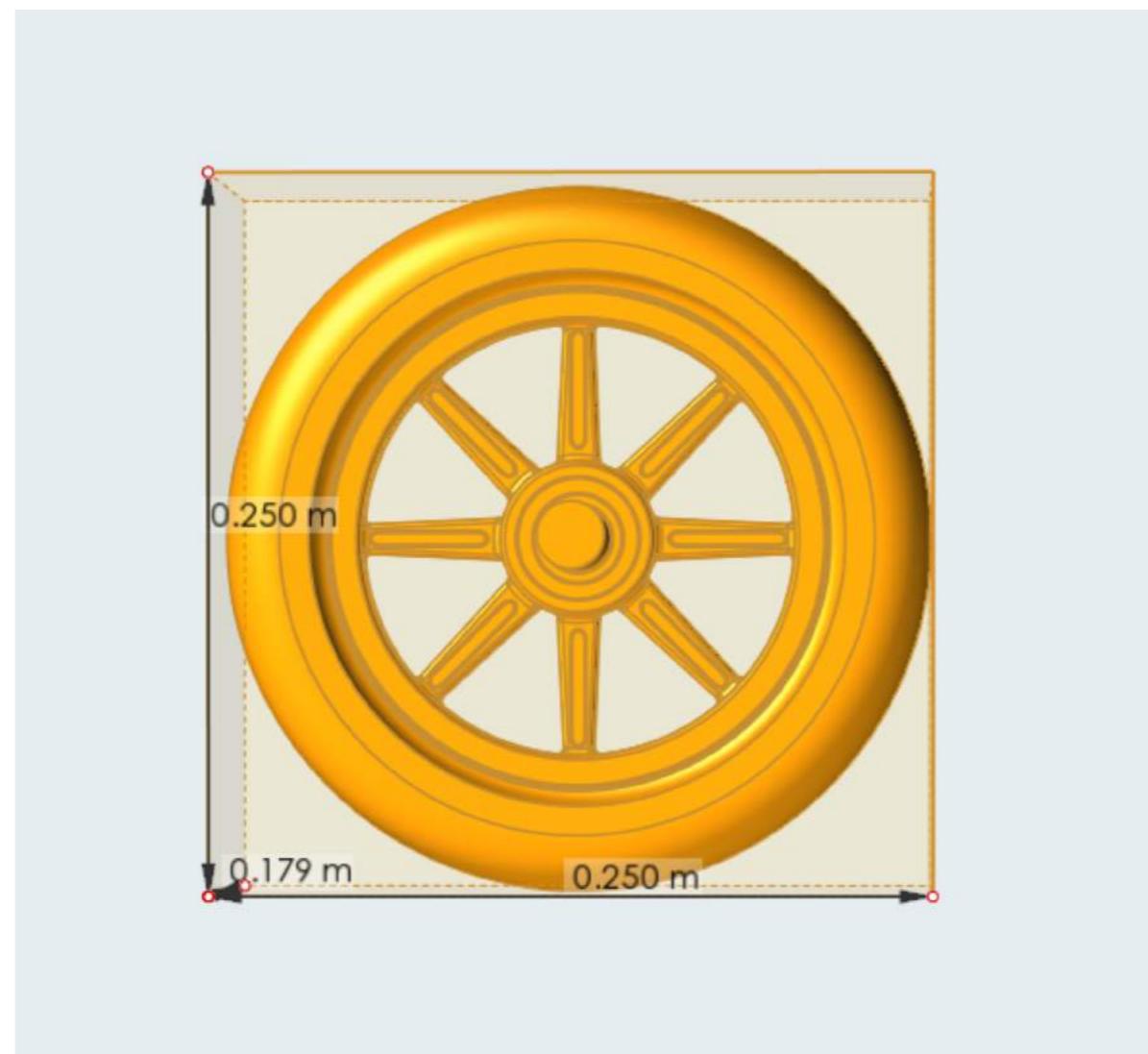
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

250W 24V DC Electric Motor



RPM – 2750

Frequency – 45.83Hz



Wheel diameter – 0.25m

$$\omega = 2\pi f$$

$$V_{(m/s)} = \frac{\omega \times r}{G}$$

where ω : angular velocity

r : radius of tire

G : gear ratio

모터에 의한 속도 측정

- 기어비를 1로 지정하고 바퀴의 규격과 모터 스펙 그리고 위의 식을 이용하여 모터에 의한 스쿠터의 최대 속도를 구함.
- 최대 속도 – **129.492km/h**

자료 출처 : 김창수,최주용(2013), Structural Analysis of The 4 Wheel Electric Scooter Frame for Handicapped, 2013년 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, 1298-1303

Natural frequency analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

LA 전동 스쿠터, 시간당 12마일로 속도 제한

라디오코리아 | 입력 08/09/2018 11:40:11

f t e | 글자크기 + -



LA시 정부는 어제(8일) 전동 스쿠터 규제안에 '속도 제한' 조항을 추가하기로 했다.

이에 따라 전동 스쿠터는 시간당 12마일 이상 달릴 수 없게 됐다.

이는 비치 크루저 자전거의 평균 속도와 비슷한 것이다.

| 자료를 기반으로 한 실제 속도 가정

- 이미 전동 스쿠터에 관한 속도 제한 규제를 하는 나라도 있고 우리나라의 경우도 모터 자체를 제어함으로써 속도를 제한하고 있다.
- 가정한 최대 속도 – **25km/h**
- RPM – **530**
- Frequency – **8.8Hz**

자료 출처 : 라디오코리아, “LA 전동 스쿠터, 시간당 12마일로 속도제한”, 2018.08.09, (<http://www.radiokorea.com/news/article.php?uid=294586>)

Natural frequency analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

파트	Front fork
Mode 1	38.03hz
Mode 2	47.58hz
Mode 3	137.66hz
파트	Body frame
Mode 1	83.13hz
Mode 2	102.66hz
Mode 3	142.21hz

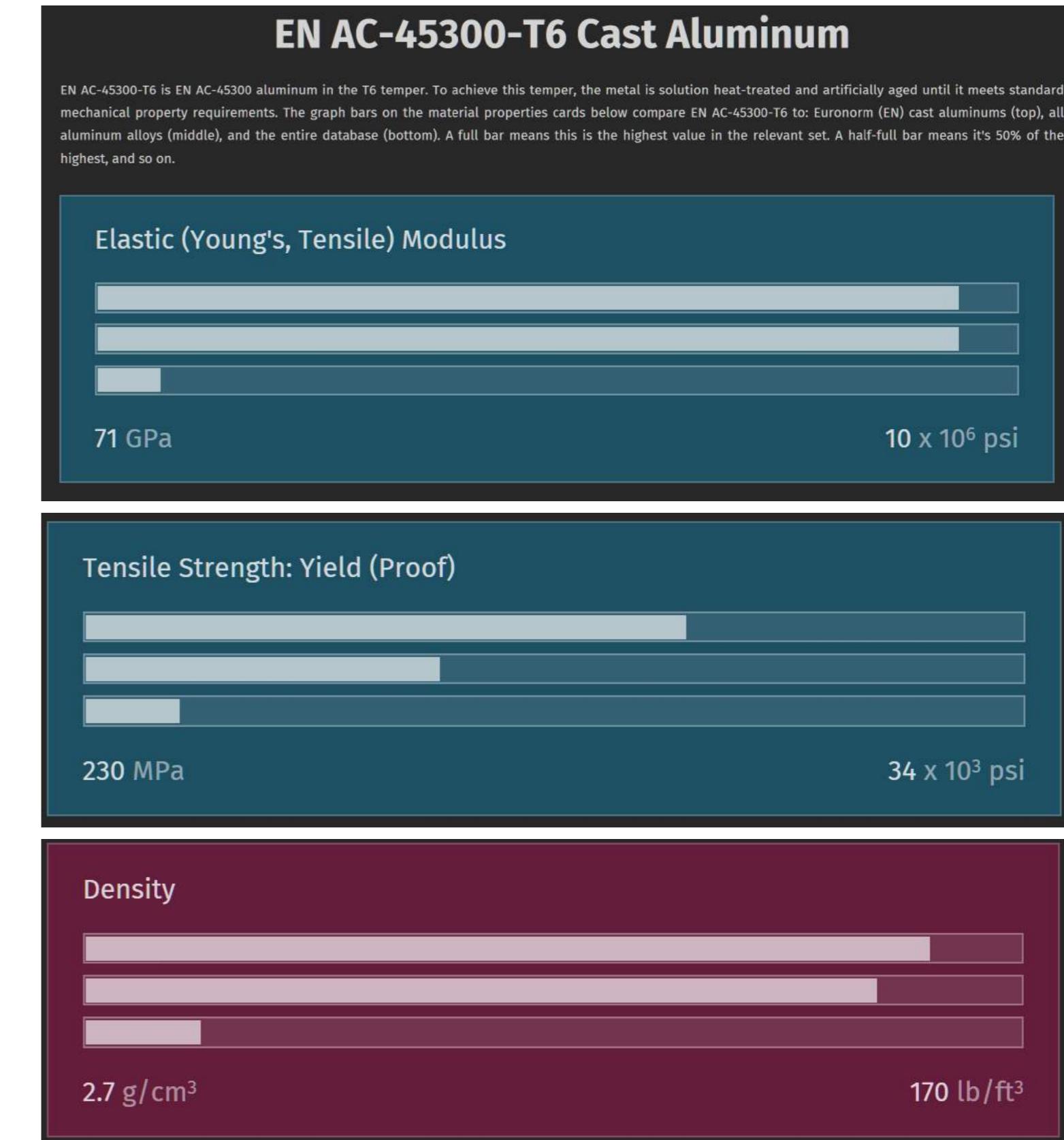
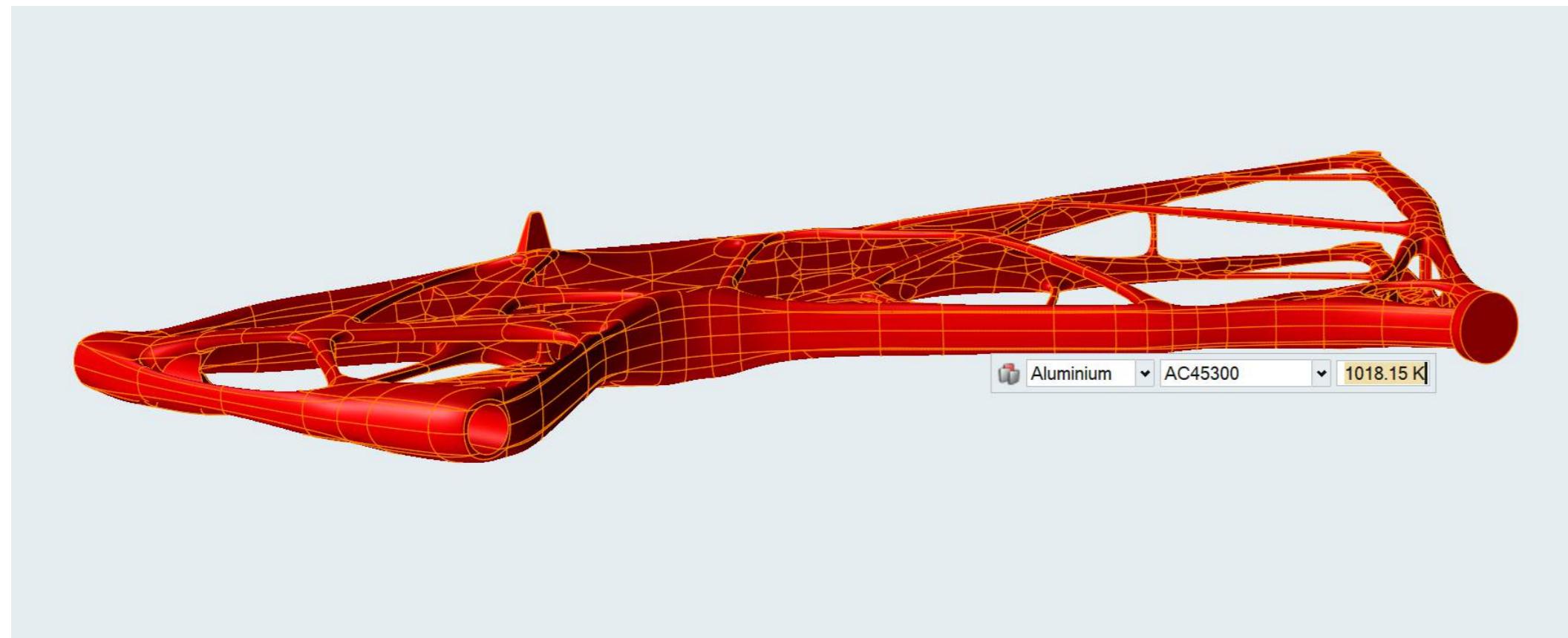
>8.8Hz

| 해석 결과

- Front fork와 body frame의 고유진동수 해석 결과 실제 주행 조건을 토대로 산출한 모터의 진동이 두 파트의 mode1~3의 주파수보다 현저하게 작으므로 **공진(resonance)**이 발생하지 않는다.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



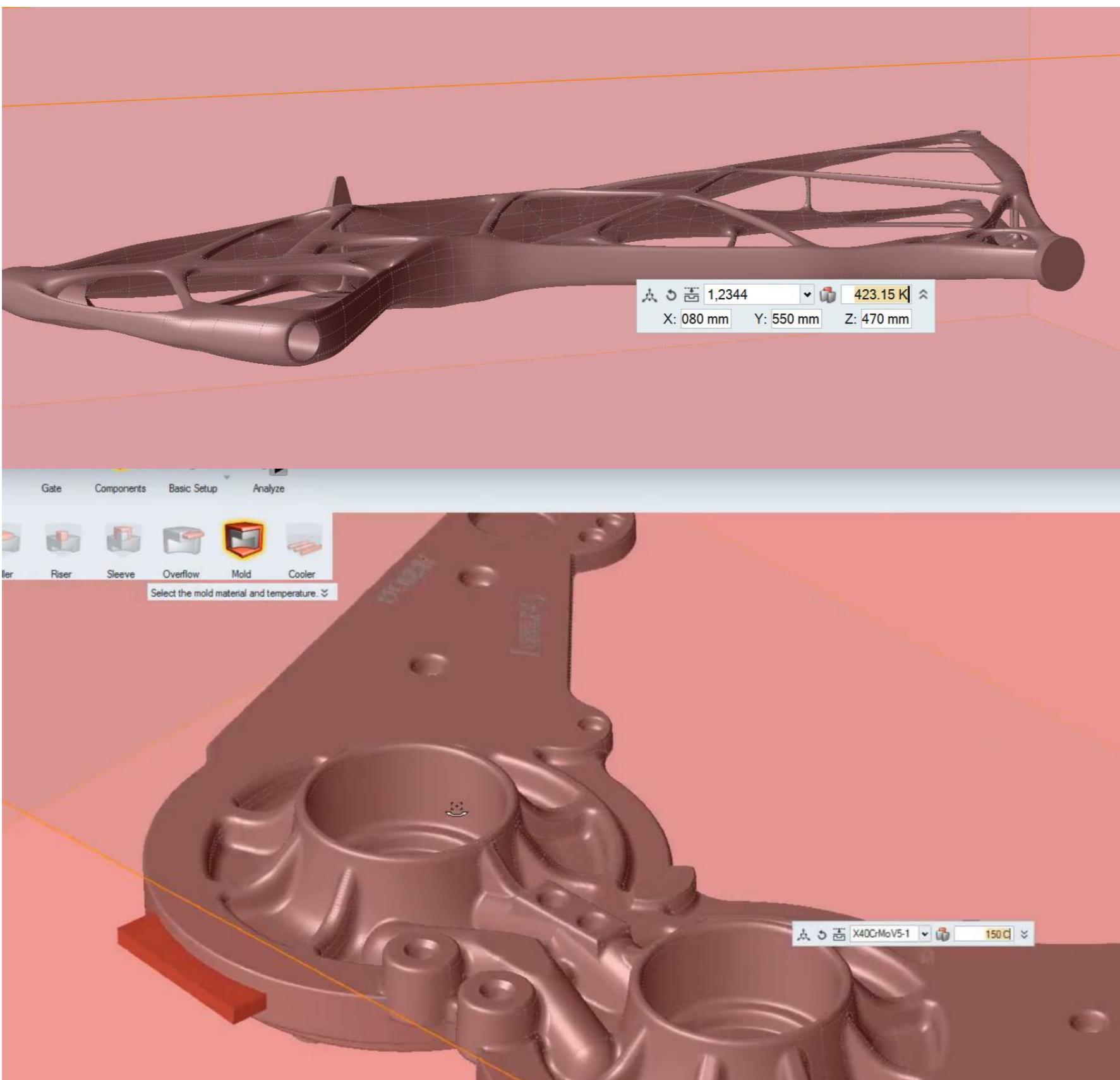
캐스팅 재질

- Altair에서 제공한 aluminum의 물성($E = 69\text{GPa}$, Yield strength = 250MPa , Density = 2700kg/m^3)과 비슷한 재질을 적용하기 위해 알루미늄 AC45300을 적용.

자료 출처 : EN AC-45300-T6 Cast Aluminum, Makelfrom, (<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-45300-T6-Cast-Aluminum>)

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



몰드 재질

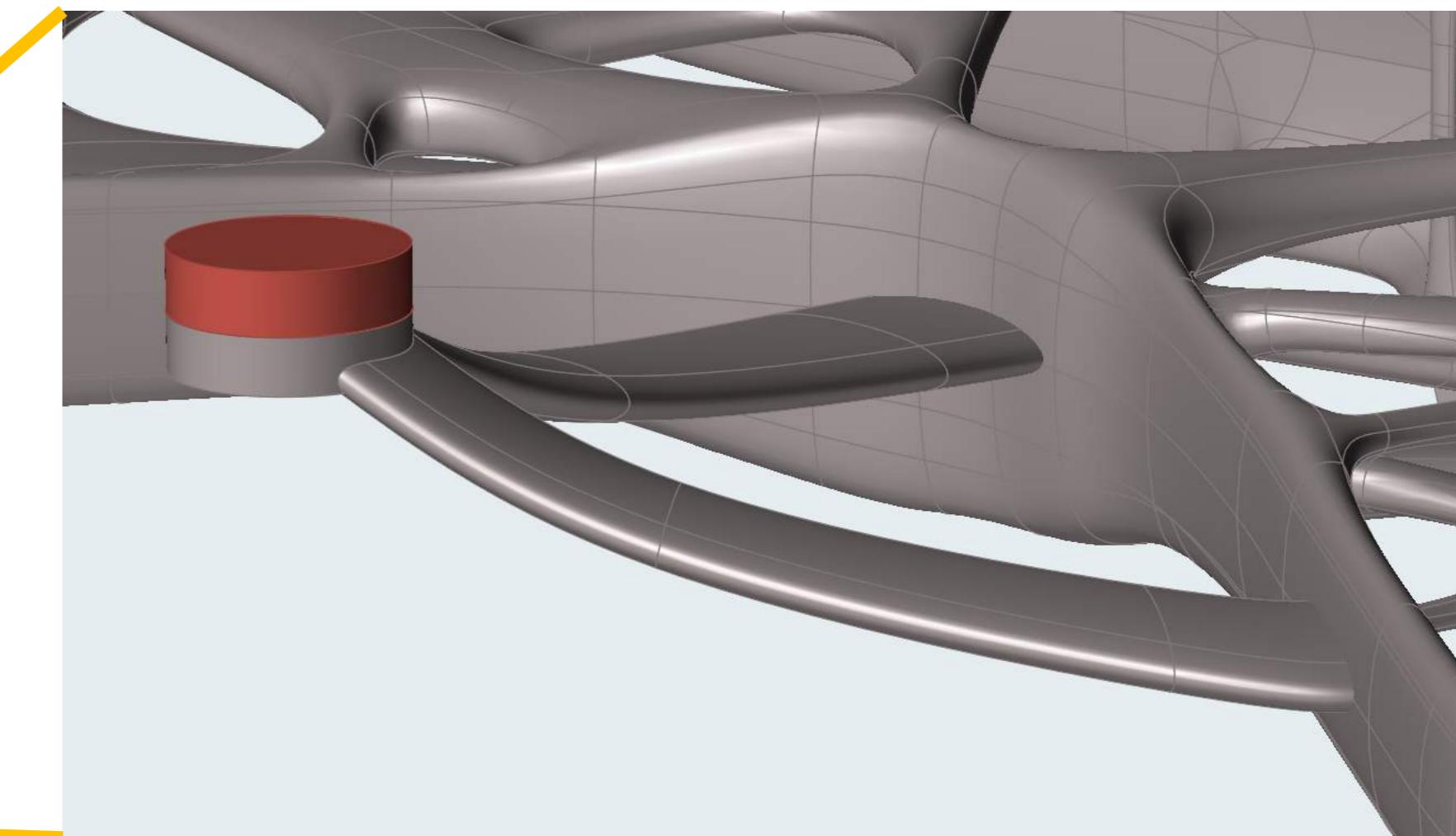
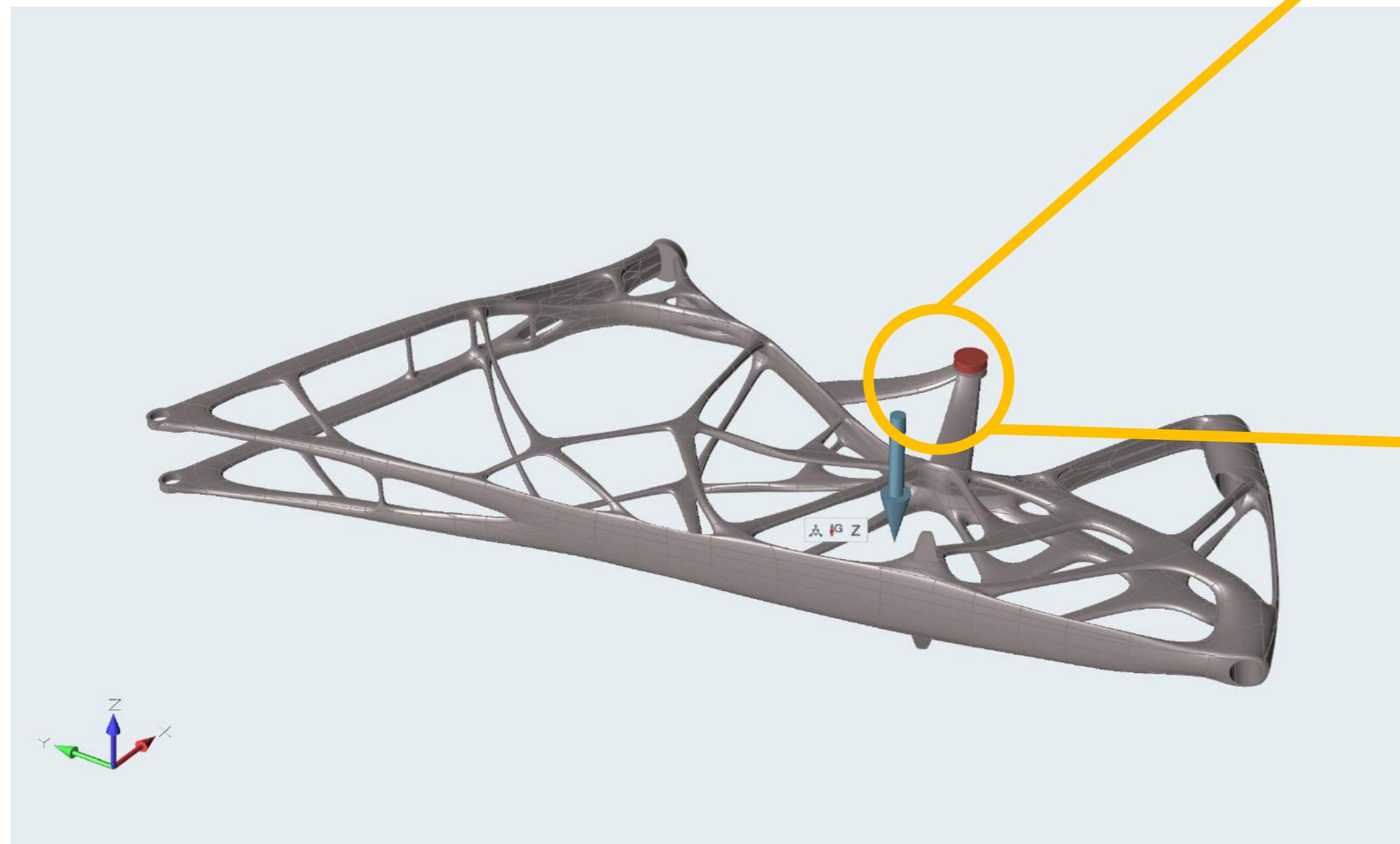
- 몰드는 Inspire Cast High Pressure Casting tutorial에서 등장한 X40CrMoV5-1 재질 = 1.2344를 이용함.

Grade :	X40CrMoV5-1
Number:	1.2344
Classification:	Hot-work tool steel
Standard:	EN ISO 4957: 2000 Tool steels
Equivalent grades:	Go here

자료 출처 : Altair inspire cast, Altair, (<https://solidthinking.com/product/inspire-cast/>)

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

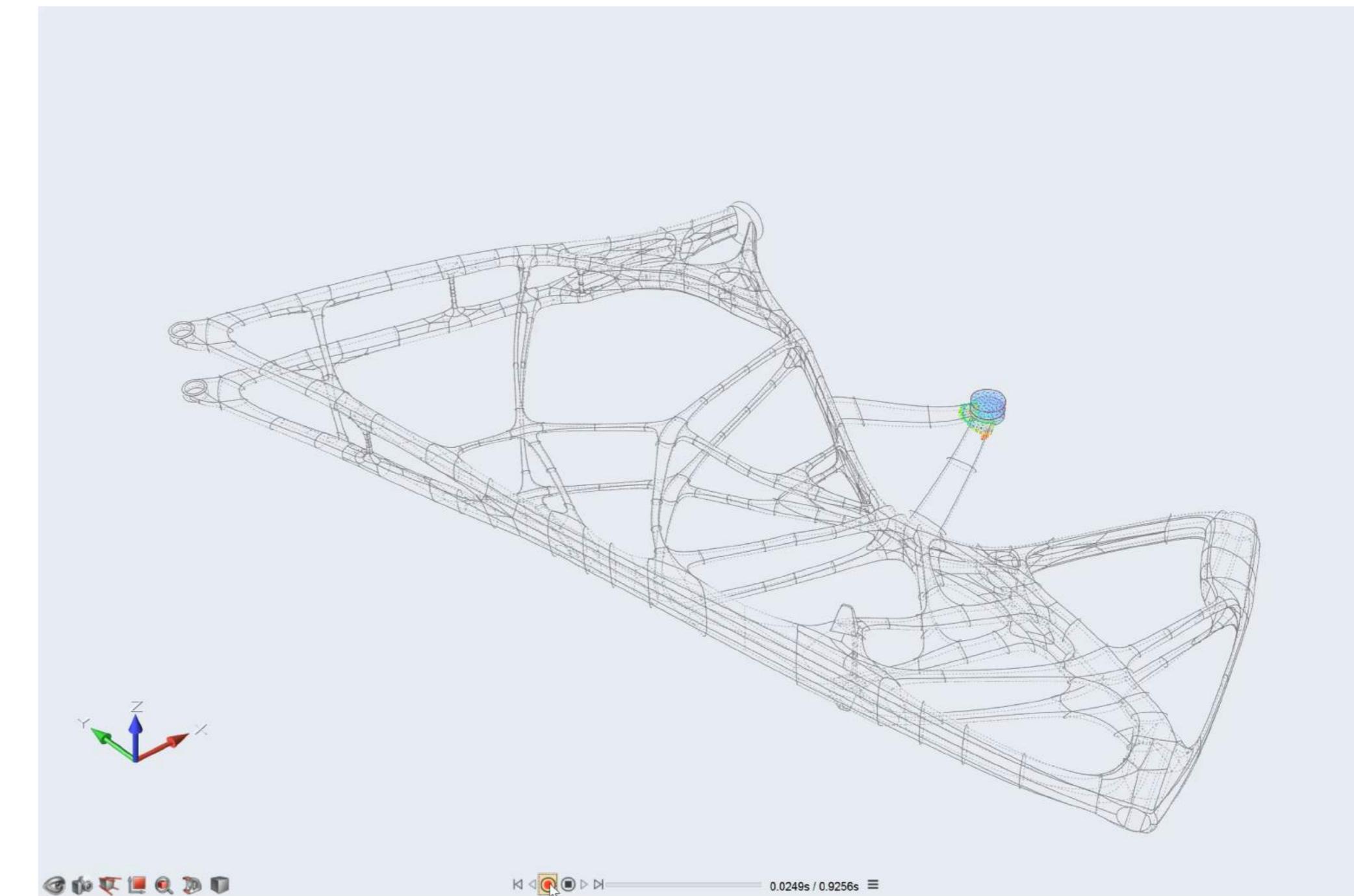
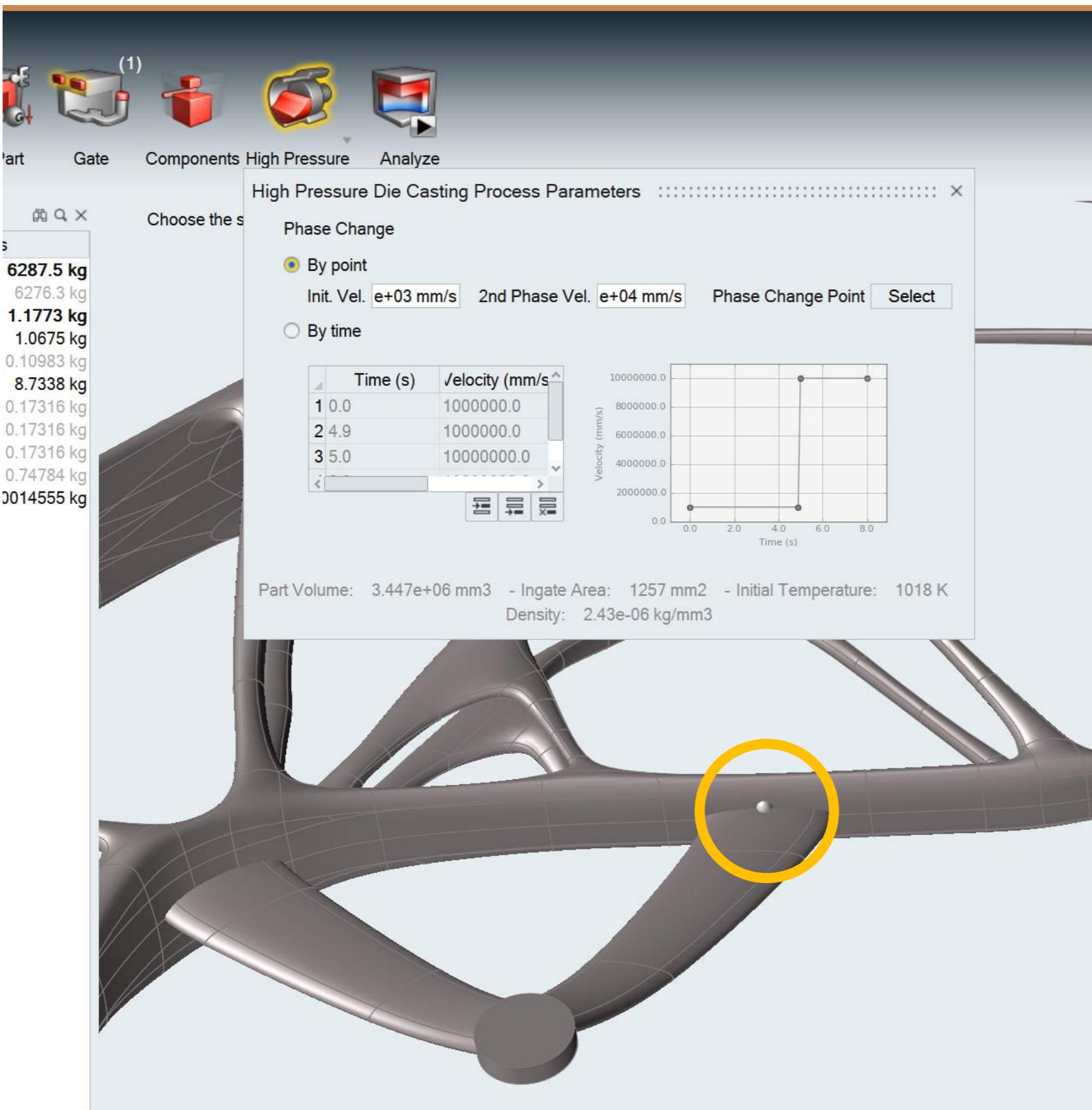


| Body frame 캐스팅 설정

- PolyNURBS를 활용하여 ingate 디자인.
- 바디 파트는 복잡한 형상을 가지고 있고 부분에 따라서 굽기가 얇은 파트가 있기 때문에, High Pressure Casting이 적합함.

Manufacturing analysis

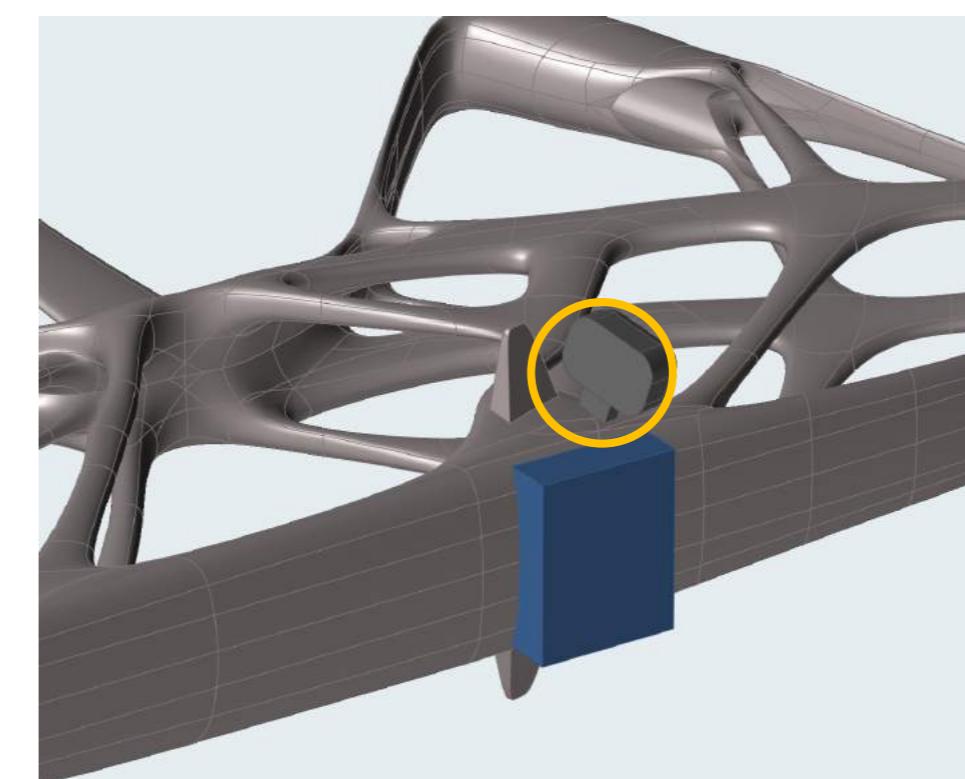
Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



- Flow velocity가 상승하는 지점을 디자인했던 ingate의 끝으로 설정.
- 영상 확인 시, ingate의 디자인이 적절하여 Laminar flow가 제대로 들어가는 것 확인 가능.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

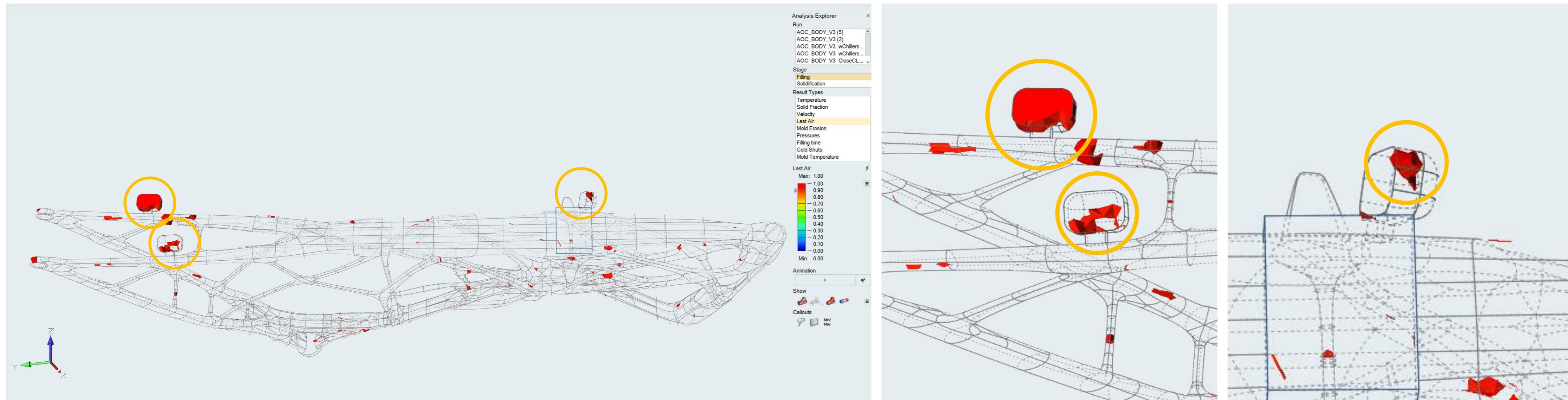


Last air 개선

- 1차 캐스팅 해석 결과 3곳에 Last air가 많이 있는 것으로 확인.
- 확인된 3곳에 overflow를 부착하여 Last air 제거 필요.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

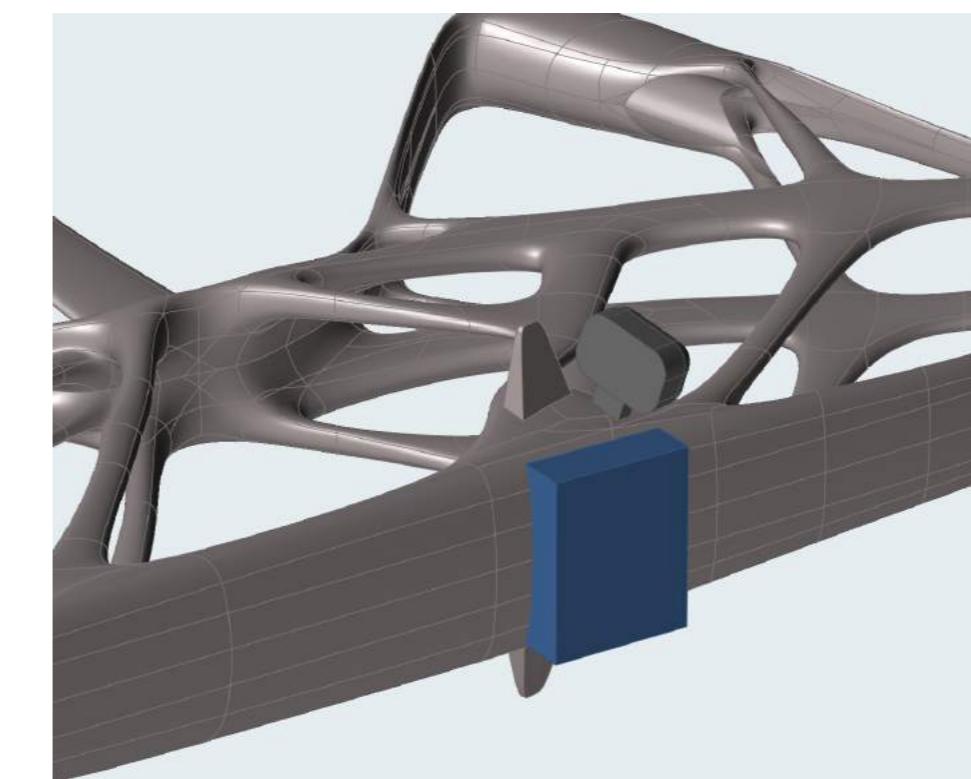
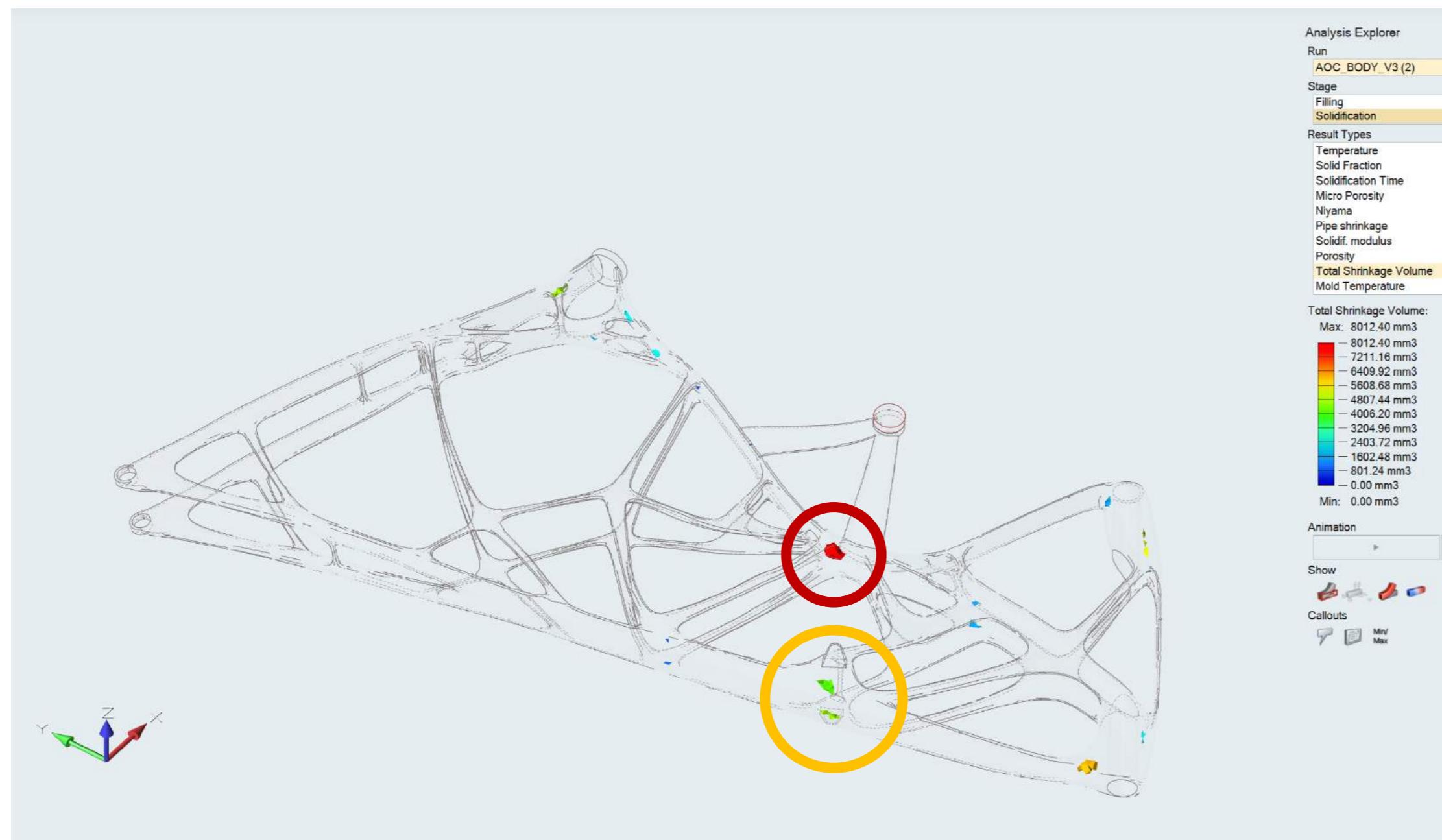


개선 결과

- Overflow를 부착한 3곳으로 Last air가 빠져나감을 확인 가능.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

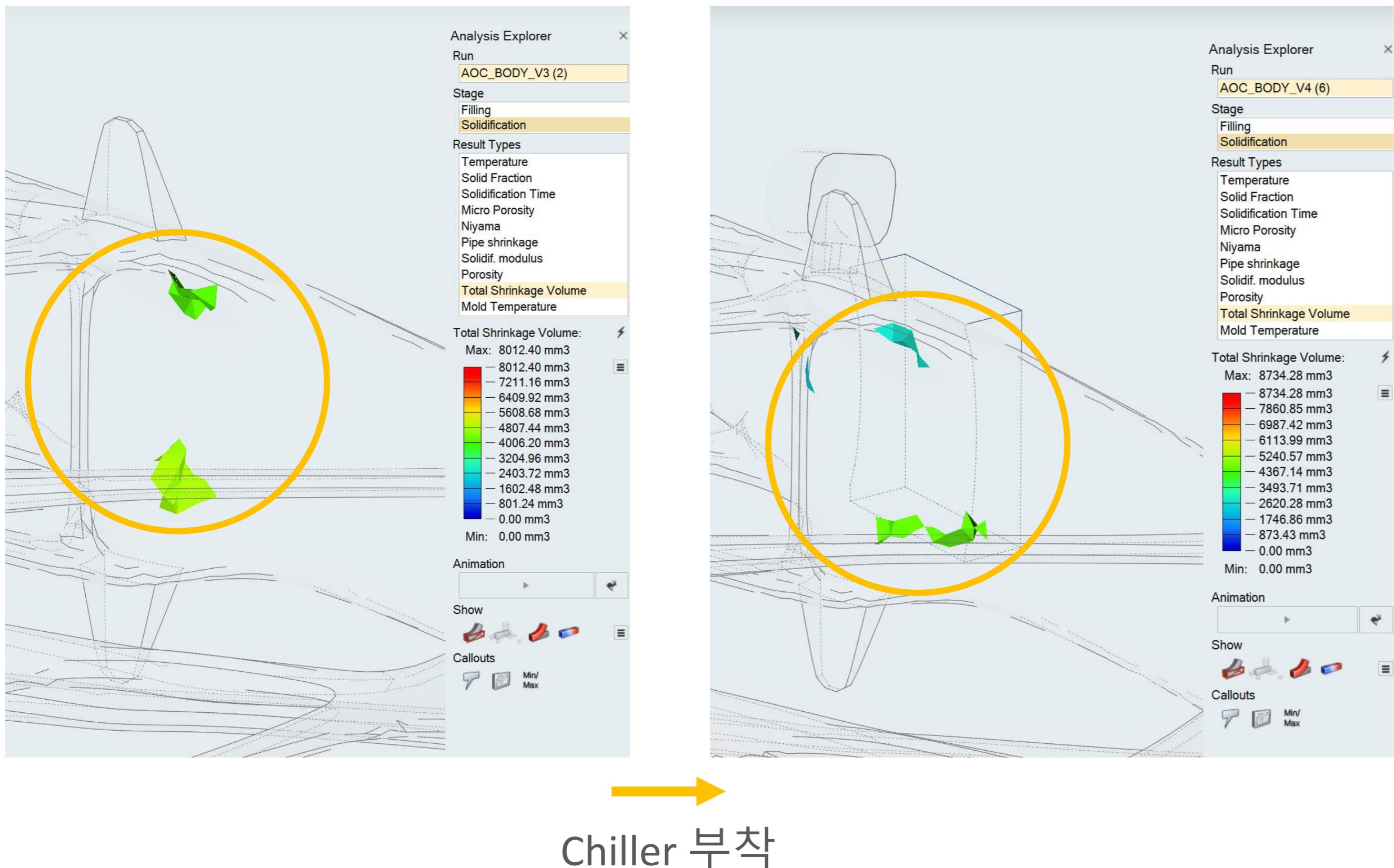


Shrinkage volume 개선

- 1차 캐스팅 해석 결과 크게 2곳에서 volume shrinkage 발생.
- 빨간 부분은 chiller를 부착하기 현실적으로 힘들어서 제외.
- 노란 부분은 chiller를 부착하여 solidification time이 줄어들 수 있도록 조치.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

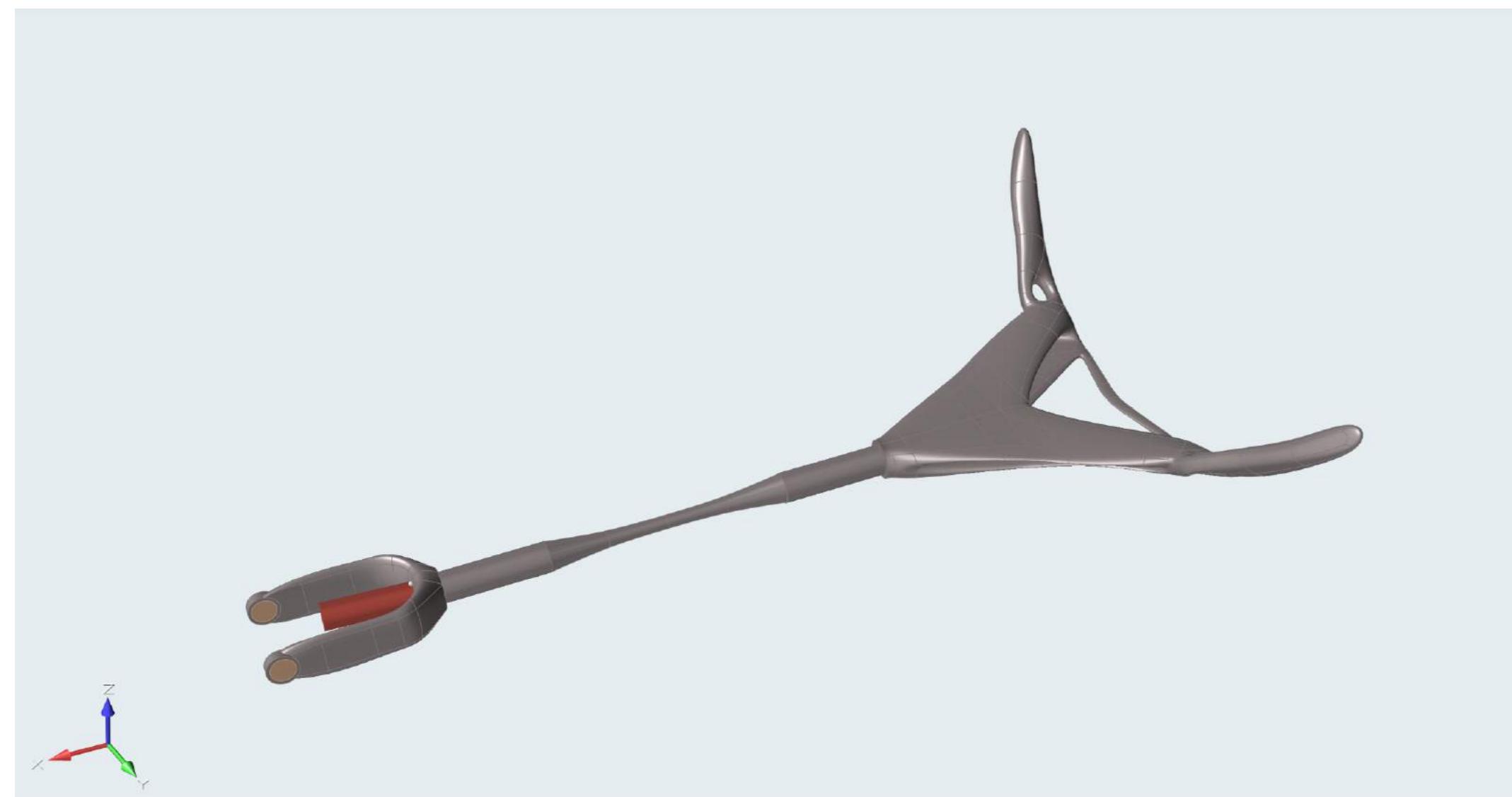


개선 결과

- Chiller를 부착 후 shrinkage volume의 감소를 확인 할 수 있음.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

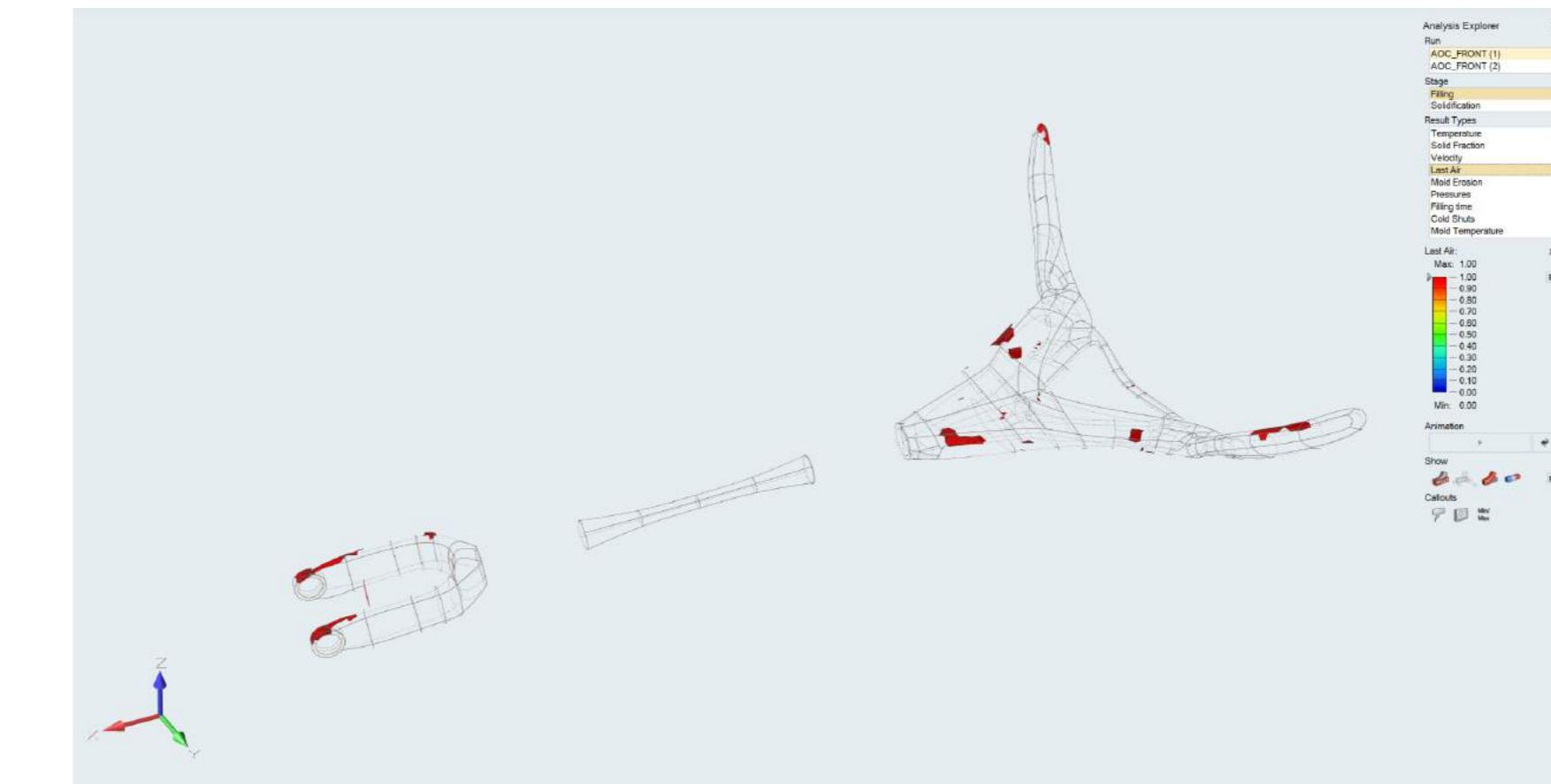


Front fork 캐스팅 설정

- Ingate를 하단부에 배치하여 디자인.
- 프론트 파트 또한 복잡한 형상을 가지고 있고 부분에 따라서 굽기가 얇은 파트가 있기 때문에, High Pressure Casting이 적합함.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

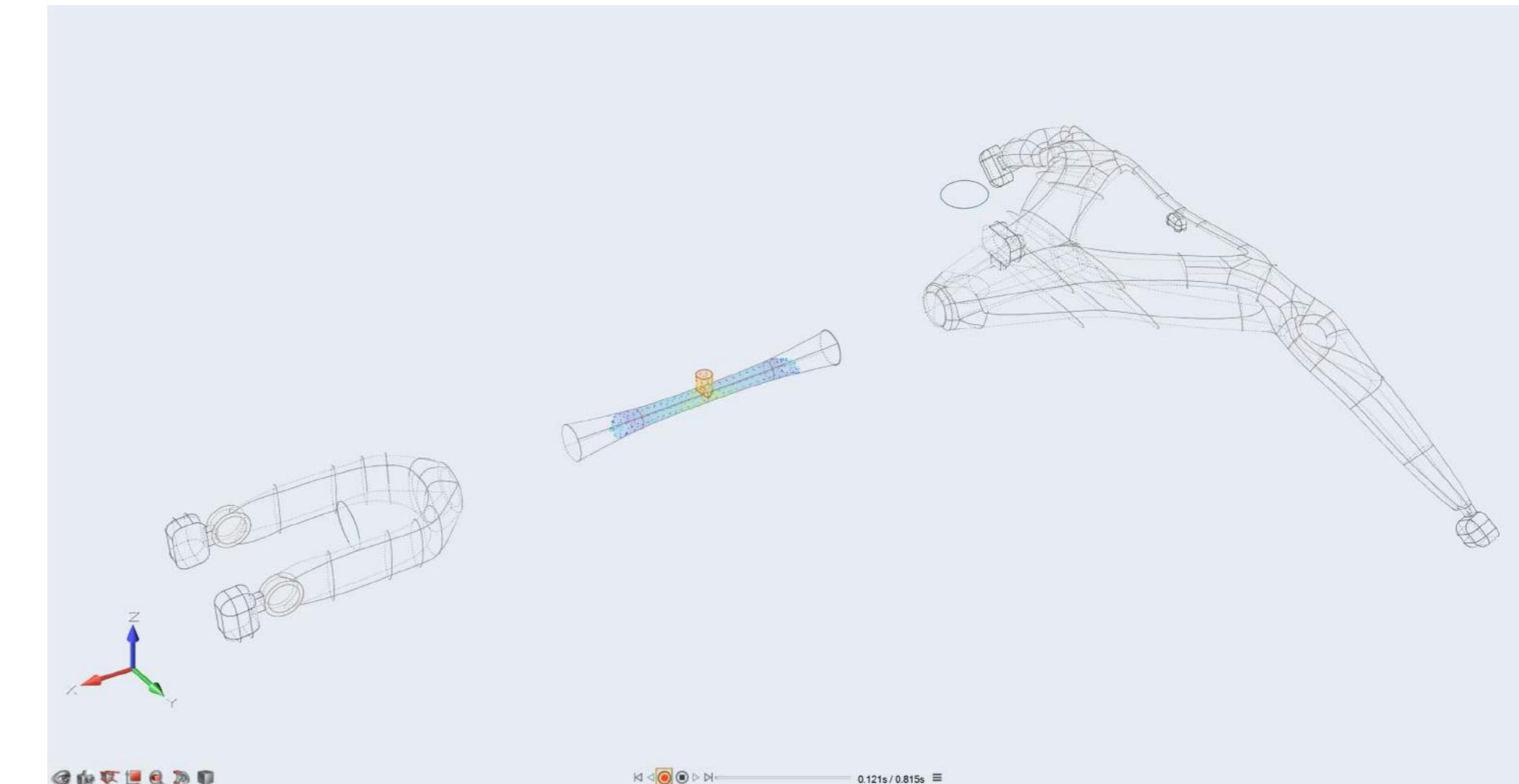
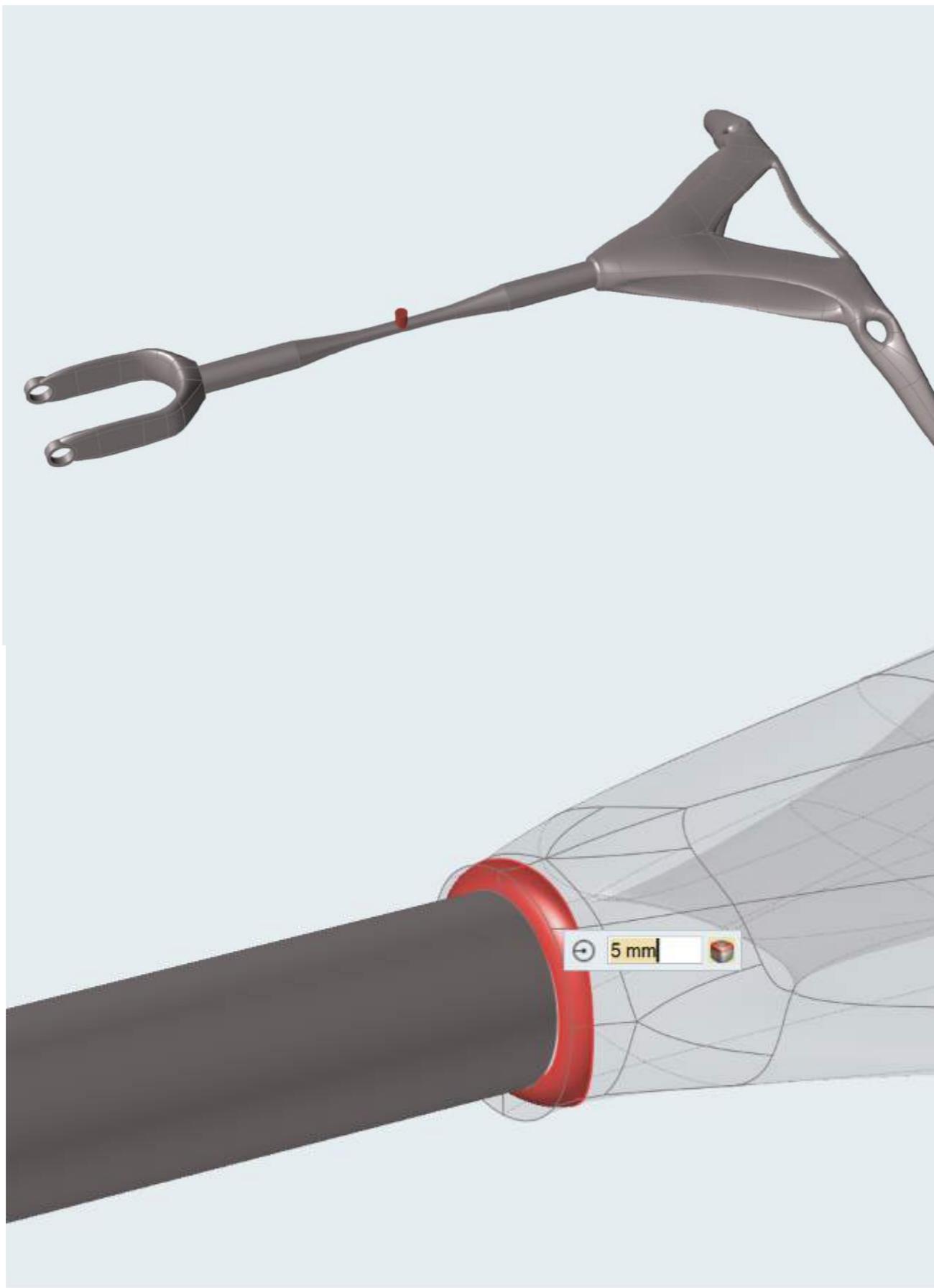


Turbulent flow 개선

- 1차 캐스팅 해석 결과 Turbulent flow로 인해 Last air가 파트 곳곳에서 발생.
- 목 부분에서 Turbulent flow가 발생하여 모델 수정(Round 처리).
- Flow의 안정성을 고려하여 ingate를 중심으로 이동.
- 손잡이 부분에서의 Flow의 방향이 Gravity 방향의 반대가 되므로 전체 모델을 뒤집어서 모든 Flow가 Gravity 방향으로 향하도록 변경.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

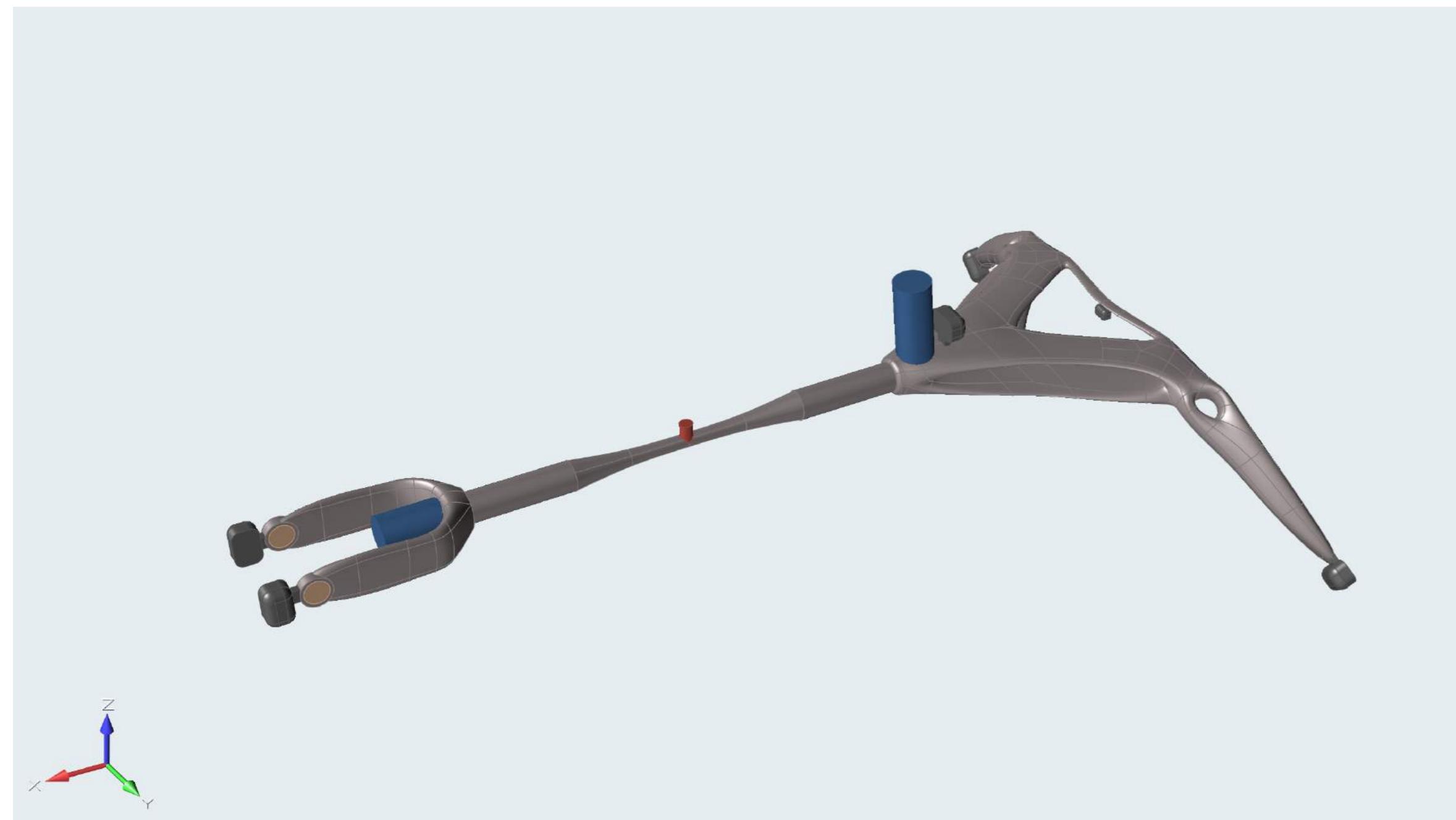


개선 결과

- Turbulent flow가 Laminar flow로 바뀐 것을 확인할 수 있다.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation

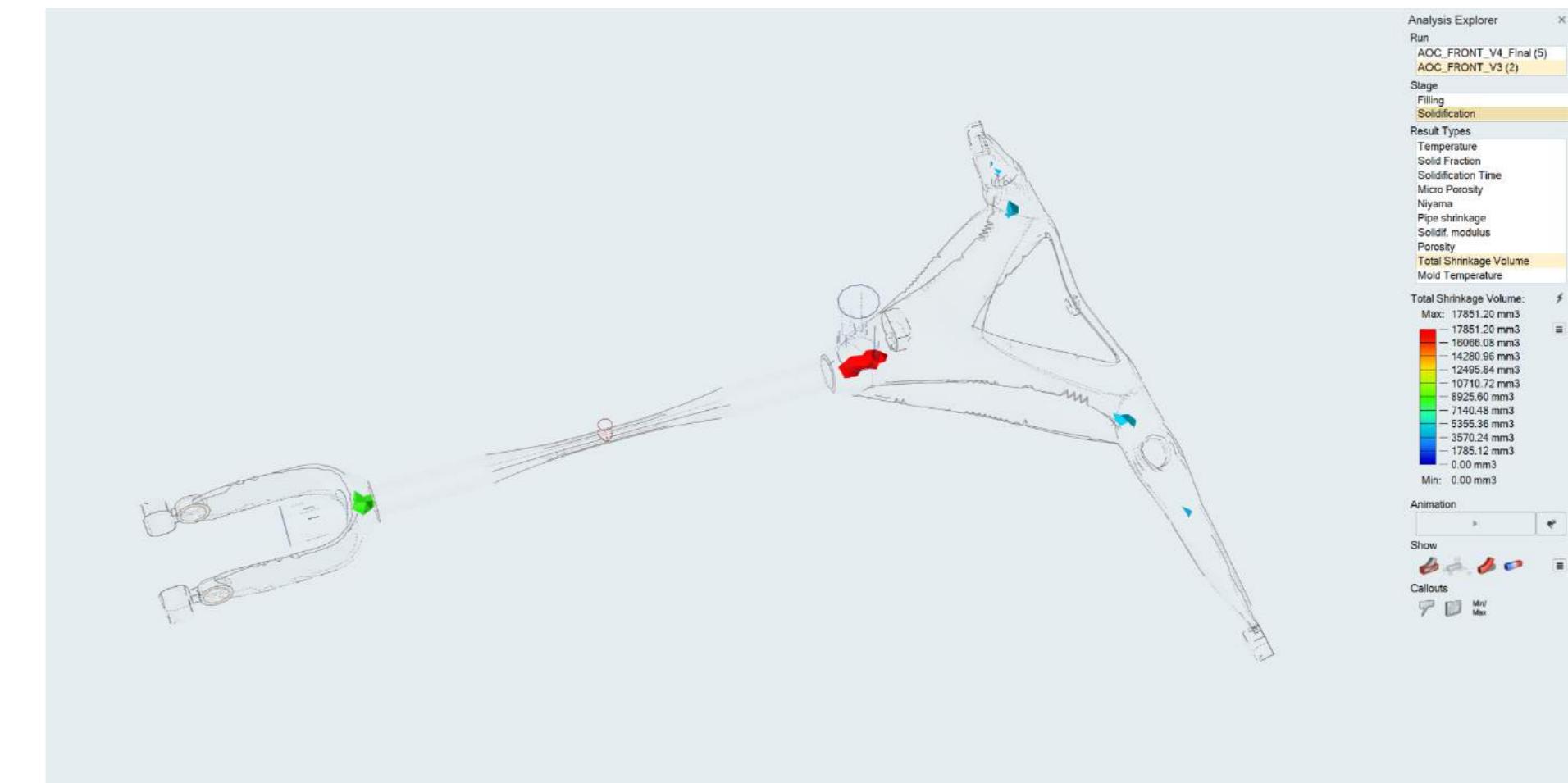
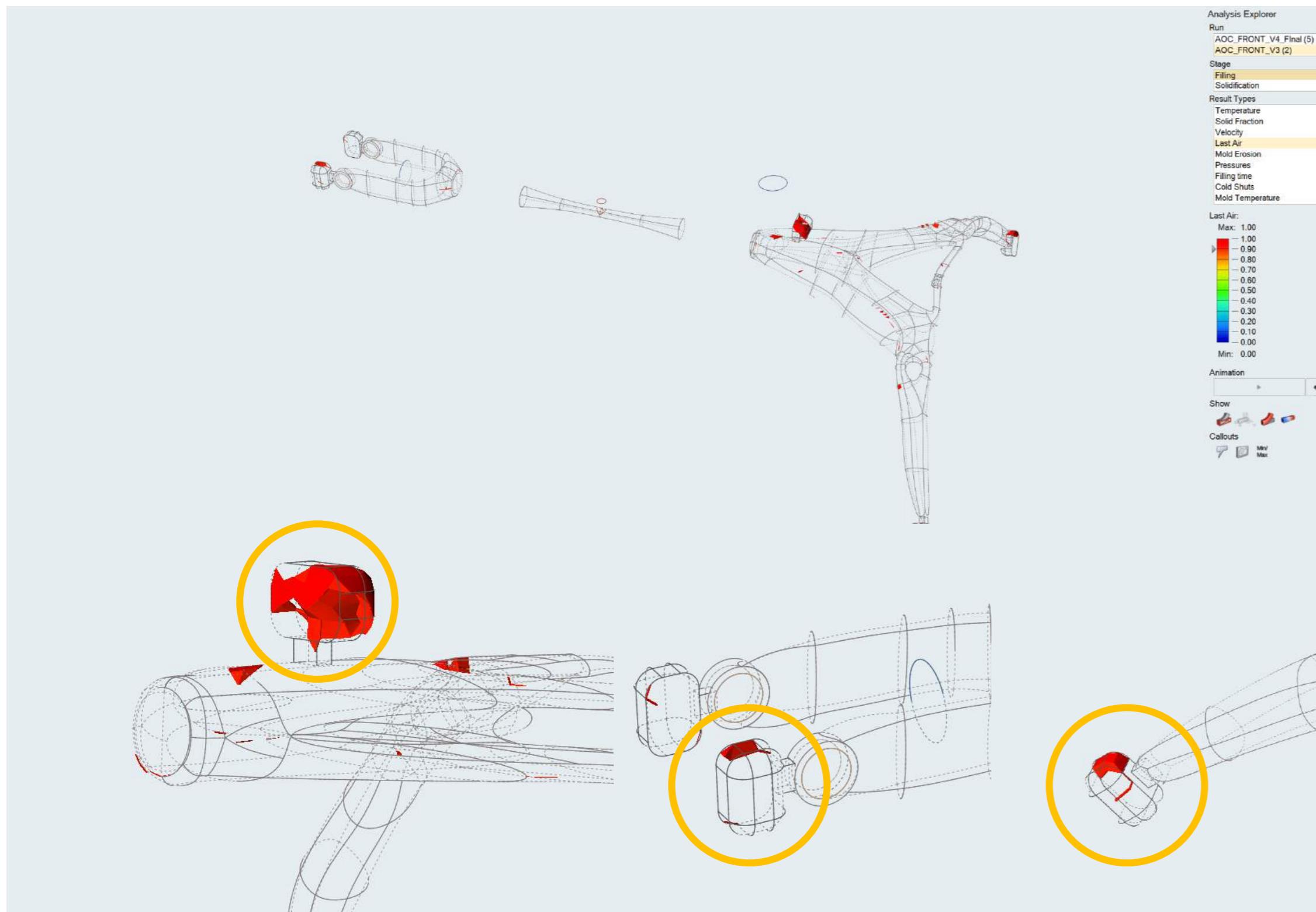


Last air & Shrinkage volume 개선

- 2차 캐스팅 해석 결과 Last air 와 Volume shrinkage 발생.
- Last air 가 발생한 곳에 overflow를 부착하고 Volume shrinkage 가 발생한 곳에 chiller를 부착하여 문제점 해결.

Manufacturing analysis

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



개선 결과

- Last air가 overflow로 들어가 제거됨을 알 수 있고 volume shrinkage가 작음을 확인할 수 있다.

Final design

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation



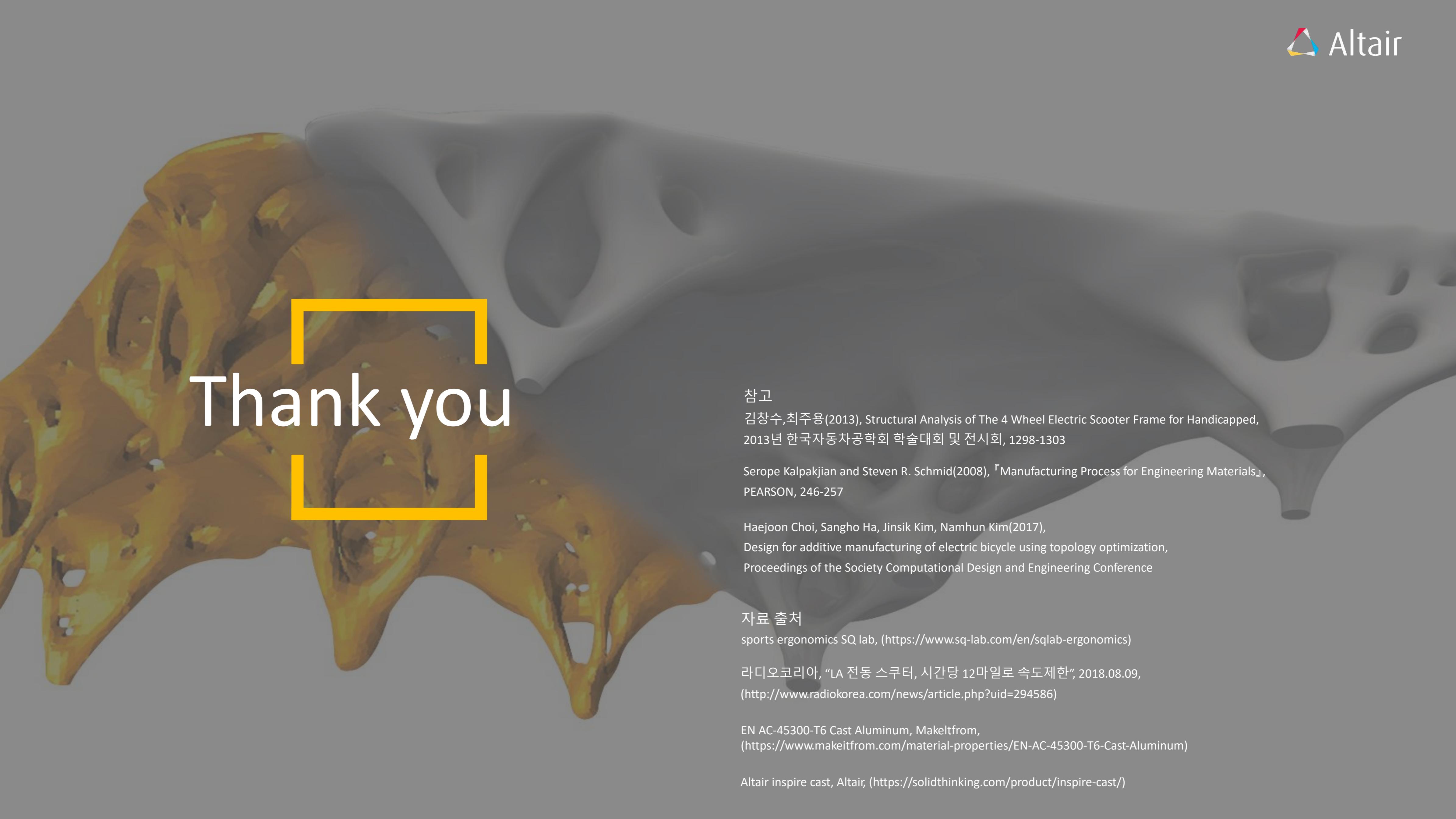
최종 질량

- Front fork – 3.48kg
 - Body Frame - 8.78kg
 - Saddle – 0.62kg
 - Battery cell * 30 – 0.954kg
 - Battery case – 0.3kg
 - 구조적으로 안정적이면서 비교 모델이었던 OJO
사의 스쿠터 보다 **52%** 중량을 경량화 하였다.
- 14.134 kg

Final design

Introduction Design space designation Design actualization Analysis and validation





Thank you

참고

김창수,최주용(2013), Structural Analysis of The 4 Wheel Electric Scooter Frame for Handicapped, 2013년 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, 1298-1303

Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid(2008), 『Manufacturing Process for Engineering Materials』, PEARSON, 246-257

Haejoon Choi, Sangho Ha, Jinsik Kim, Namhun Kim(2017), Design for additive manufacturing of electric bicycle using topology optimization, Proceedings of the Society Computational Design and Engineering Conference

자료 출처

sports ergonomics SQ lab, (<https://www.sq-lab.com/en/sqlab-ergonomics>)

라디오코리아, “LA 전동 스쿠터, 시간당 12마일로 속도제한”, 2018.08.09, (<http://www.radiokorea.com/news/article.php?uid=294586>)

EN AC-45300-T6 Cast Aluminum, Makelfrom, (<https://www.makeitfrom.com/material-properties/EN-AC-45300-T6-Cast-Aluminum>)

Altair inspire cast, Altair, (<https://solidthinking.com/product/inspire-cast/>)