AOC2020 Optimization of fire fighting wearable robot

Kyunghyun. Yoo

Seungwon. Lee

Advisor
Prof. Cheolsoo.Lee

Sogang University,
Mechanical Engineering

Contents

1 . Introduction

- What is wearable robot?
- Fire fighting wearable robot
- Referenced Model & Specifications

2 . Initial Modeling

- Global Assumption
- Initial Modeling

3 . Formulation & optimization

- Cell support
- Back
- Thigh part & Calf part

4 . Analysis

- Cell support
- Back
- Thigh part & Calf part

5 . Final design

- **Final design**

1 . Introduction

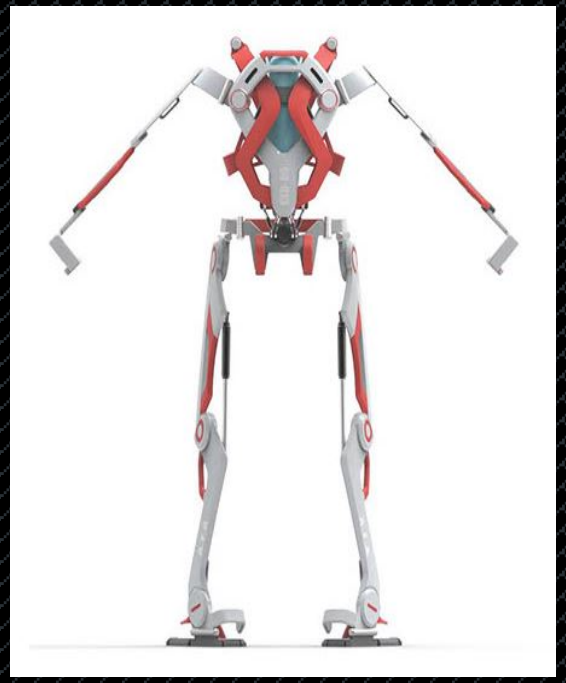
1. Introduction-What is wearble robot?

- 사람의 보행능력을 향상시키거나 무거운 물체를 운반하는 등 **여러 기능을 높이기 위해** 인간의 몸에 착용하는 로봇

- 중량물 이송 작업 보조용, 하지재활치료용, 군사용, 레져용 등 다양한 분야에서 활용하기 위해 활발한 연구가 진행되고 있음

사진출처 1) Hyundai-Kia Motors' VEX 2) Ekso bionics 3)www.genmedia.co.kr/news/articleView.html?idxno=14010

1. Introduction-Fire fighting wearble robot



- 소지할 수 있는 산소통 용량을 늘려주며 이에 따라 구조 작업 시간이 월등히 늘어남
- 작업 시 소방관의 육체피로 경감
- 유압 액츄에이터가 많이 사용됨
- 하드웨어의 메인 이슈 중 하나는 **경량화**

사진출처 1) Trigen Automotive 2) A'DESIGN AWARD&COMPETITION 3)한국 생산기술연구원

1. Introduction-Fire fighting wearble robot

'로보파이어맨' 나온다...소방관용 웨어러블 로봇 선보여

산소통 용량이 늘어난 만큼 화재 현장에서 인명을 구조할 수 있는 시간은 기존 45분에서 90분으로 2배 늘어난다.

또 로봇을 입은 소방관은 이전보다 하체 피로를 적게 느낀다.

그동안 미국과 일본에서 사람의 힘을 돕는 웨어러블 로봇을 개발했으나 국방용·산업용으로만 활용했다.

출처=연합뉴스, 손대성 기자

Ktech 리포트

[Ktech 이슈리포트] 웨어러블 로봇의 기술동향과 산업전망

향후 웨어러블 로봇의 R&D 방향

웨어러블 로봇의 연구개발 방향은 크게 세 가지로 볼 수 있는데 첫 번째는 경량화와 저가화입니다. 비싼 가격과 무겁고 복잡한 시스템, 불편한 착용감 등의 요인으로 웨어러블 로봇 대중화가 어려웠다면 가볍고 단순한 시스템, 편안한 착용감을 갖는 단순 경량의 웨어러블 로봇을 개발하는 방향으로 진행될 것으로 예상됩니다. 다음으로는 부위별 보조인데요. 어렵고 복잡한 전신 보조나 반대로 많은 자유도로 신체의 여러 부위를 보조하기 위한 소재, 배터리, 제어 부분의 연구도 활발히 진행되는 한편, 상용화 측면에서는 현재의 기술수준으로 어깨, 허리, 무릎 등 특정 관절(부위)를 효과적이고 실질적으로 도움을 줄 수 있는 방향으로 개발될 것으로 예상됩니다. 마지막으로 새로운 구동 매커니즘의 개발입니다. 물류·유통 작업 등에서는 팔, 어깨, 허리 등을 복합적으로 보조해야 할 필요성이 있으나 모터 같은 전통적인 구동기만으로는 무게를 줄이고 가격을 낮추는 데에는 한계가 있어요. 그래서 가볍고 저렴한 혁신적 구동기가 개발되기 전까지는 보조 부위를 한정하여 구동기를 최소화하거나 수동형 매커니즘을 활용하는 방향의 개발이 진행될 것으로 예상됩니다.

출처=ketch 이슈리포트, 47화

1. Introduction-Referenced Model

사진=FRT

하이퍼 R1(HYPER R1)

개발 : 한국생산기술연구원

용도 : 소방관용 하지 근력지원 로봇

운용시간 : 2.5시간

무게 : 25kgf (산소통, 파워팩 제외)

최대 보행 속력 : 6km/h

가반하중 : 30kgf

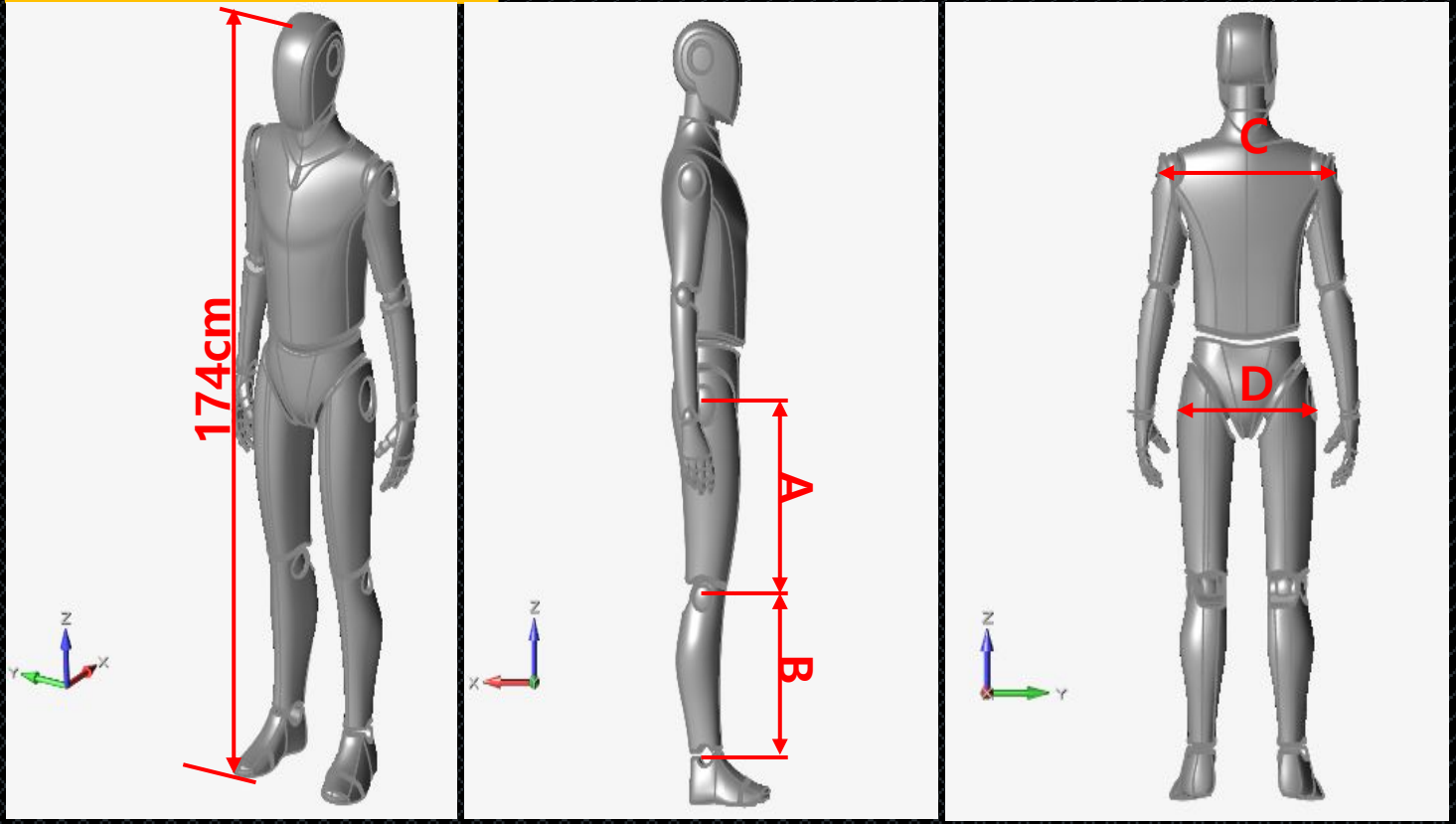
구동방식 : 유압구동

가반 하중이란? 로봇이 들어올릴 수 있는 **최대 무게**를 말함

2 . Initial Modeling

2. Initial Modeling-Global Assumption

착용자의 신체조건



키 : 174cm

허벅지 길이(A) : 42cm

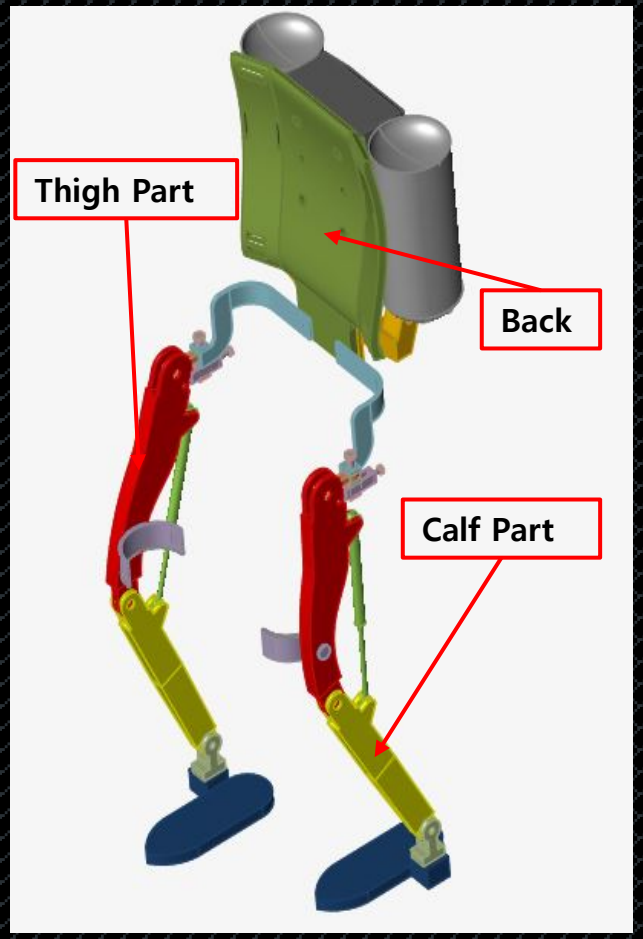
종아리 길이(B) : 40cm

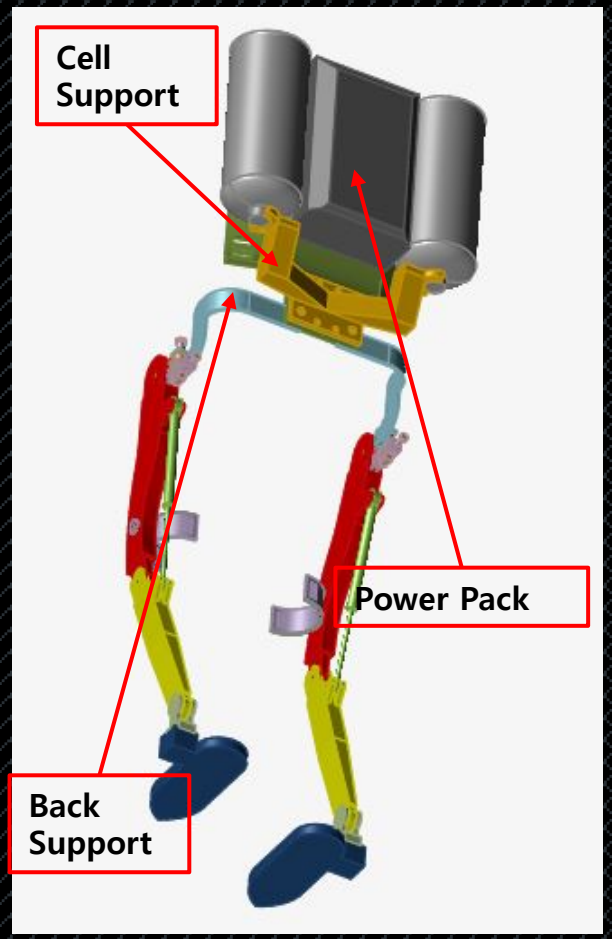
어깨 너비(C) : 48cm

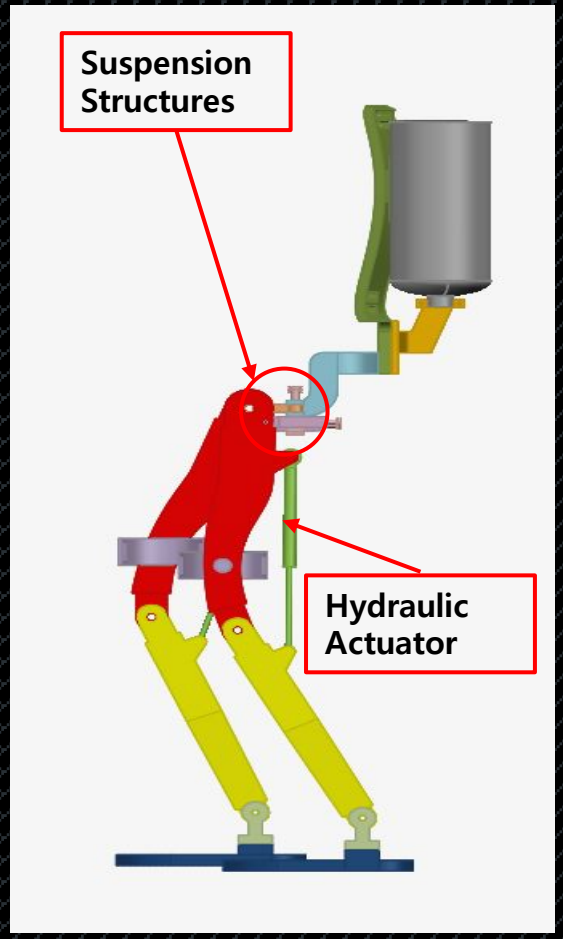
골반너비(D) : 31.5cm

* 8명의 신체조건을 측정, 평균 낸 치수

2. Initial Modeling-Overall view







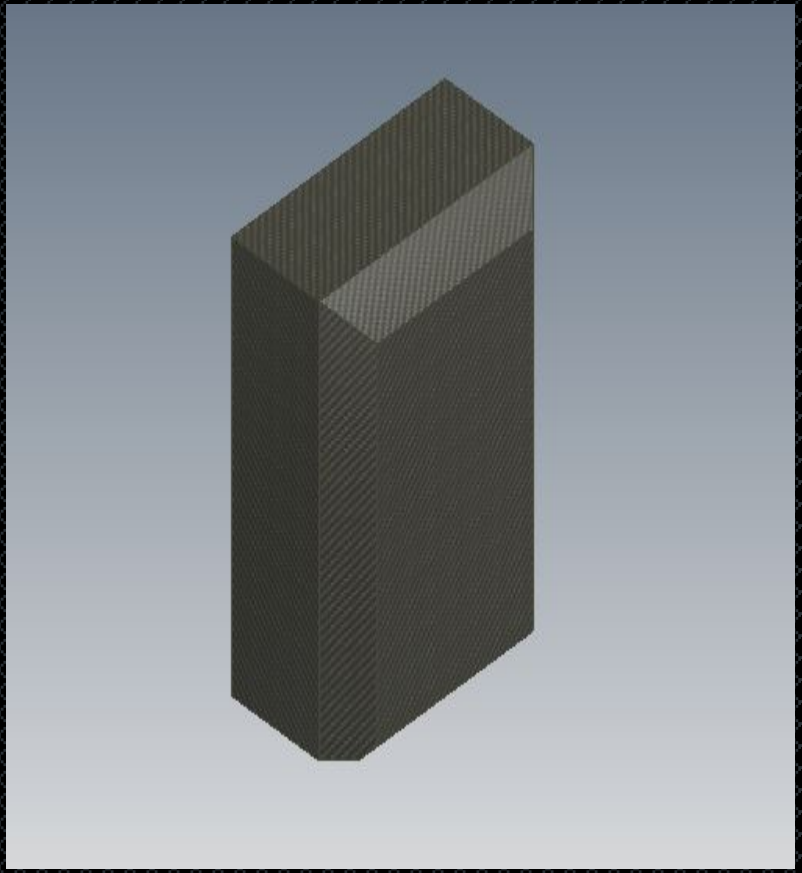
2. Initial Modeling-Global Assumption

사진=산청

구분		SCA 420	SCA 680	SCA 790
사용시간		약 30분	약 45분	약 60분
총 중량		7kg이하	9kg이하	11kg이하
충전가스		공기 (AIR)		
관련검사		한국소방산업기술원 검정품		
용기	재질	Carbon Cylinder (fully wrapped composite cylinders)		
	내용적	약 4.7ℓ	약 6.8ℓ	약 9.0ℓ
	최고충전공기량	약 1,457ℓ	약 2,040ℓ	약 2,790ℓ
	중량	약 3.2kg	약 3.6kg	약 5kg
	최고충전압력 (FP)	약 310bar	약 300bar	약 310bar
	내압시험압력 (TP)	약 517bar	약 500bar	약 517bar
	관련검사	한국가스안전공사 검사품, 미국 D.O.T 검사품		

- `산청'사 의 SCA790 모델을 기준으로 함
- 반지름 160mm, 총 길이 380mm로 모델링
- 중량은 **11kg으로 가정**

2. Initial Modeling-Global Assumption



- 배터리팩과 유압 액츄에이터 구동을 위해 필요한 모터, 제어기, 컴퓨터 등을 파워팩을 **단순하게 모델링 함**

- 6개의 볼트로 Back(등판)과 연결됨

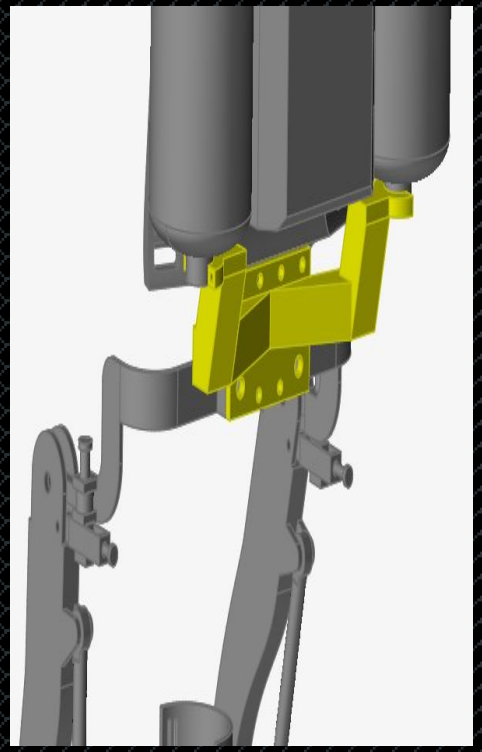
- 중량은 8kg으로 가정

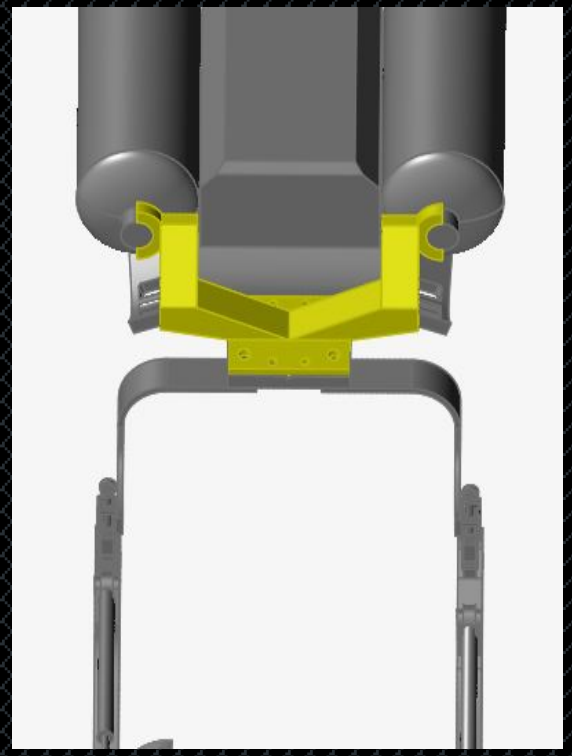
- 가반하중과는 관련이 없는 것으로 가정(가반하중을 깎아먹지 않음)

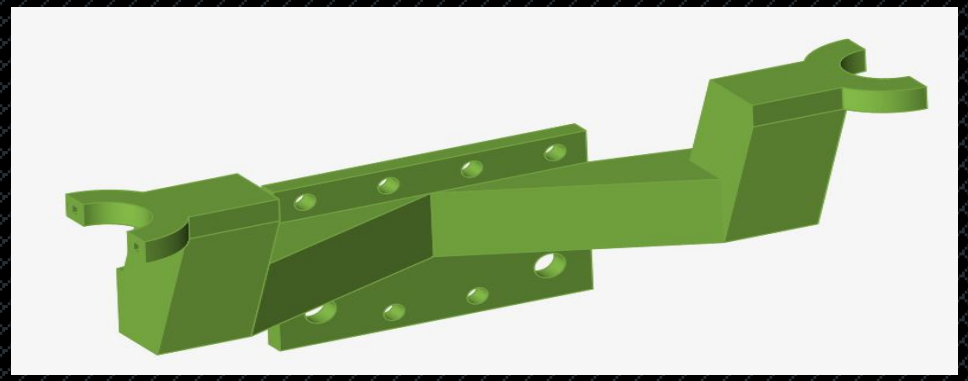
$+\alpha$

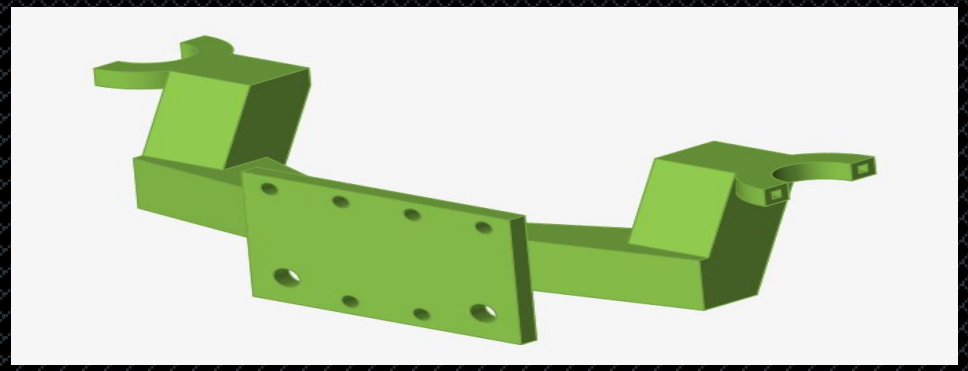
제어는 완벽하게 이루어져 작동 시에 사용자의 움직임을 정확하게 따른다.

2. Initial Modeling-Main parts(Cell support)









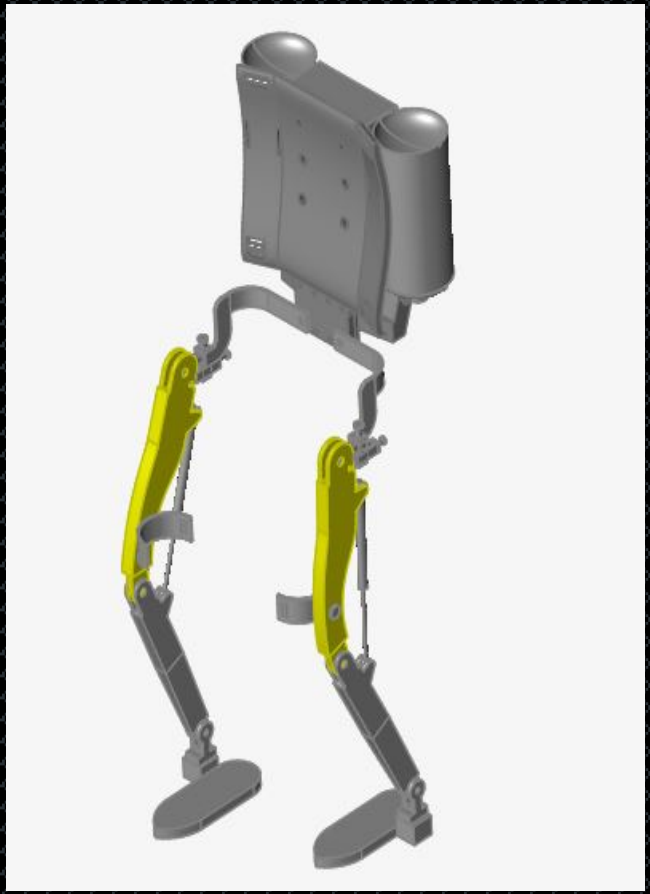
- 산소통(Cell)을 지지하기 위한 부품, 2개의 산소통을 지지한다.

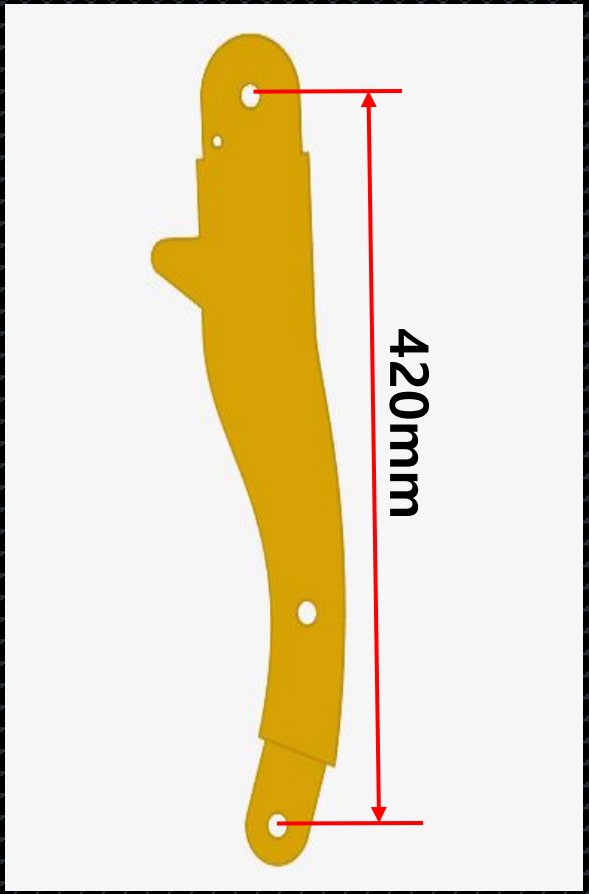
- 케이블 타이 등을 이용하여 산소통 입구를 고정하는 구조

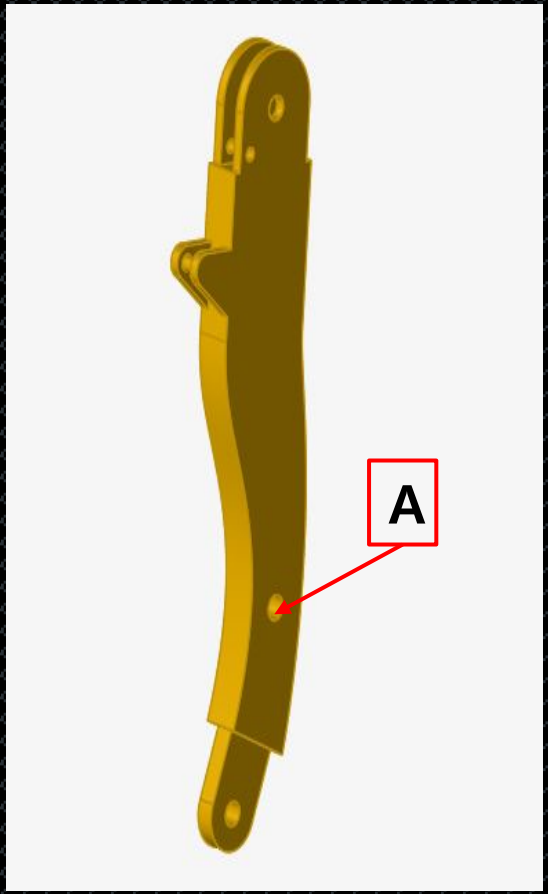
2. Initial Modeling-Main parts(Back Part)

- 척추의 형상을 고려하여 전체적으로 S-curve로 설계, 사용자의 어깨너비와 신장을 고려한 설계
- 파워팩을 고정하는 구멍, 어깨끈 구멍, 산소통 구멍, 산소통 고정 홈 등 구현
- 등과 직접 닿는 파트가 아님. 쿠션 탈착식을 가정

2. Initial Modeling-Main parts(Thigh part)

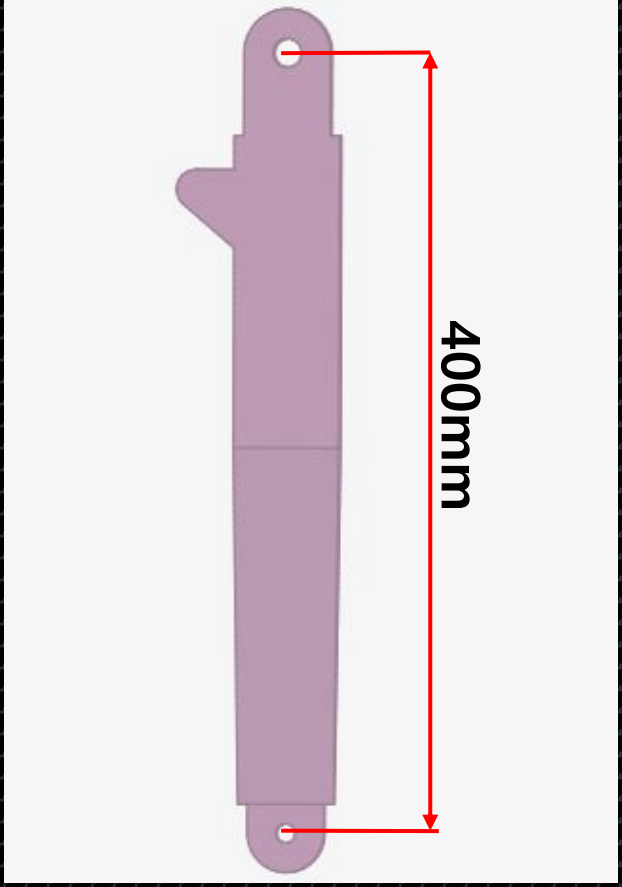


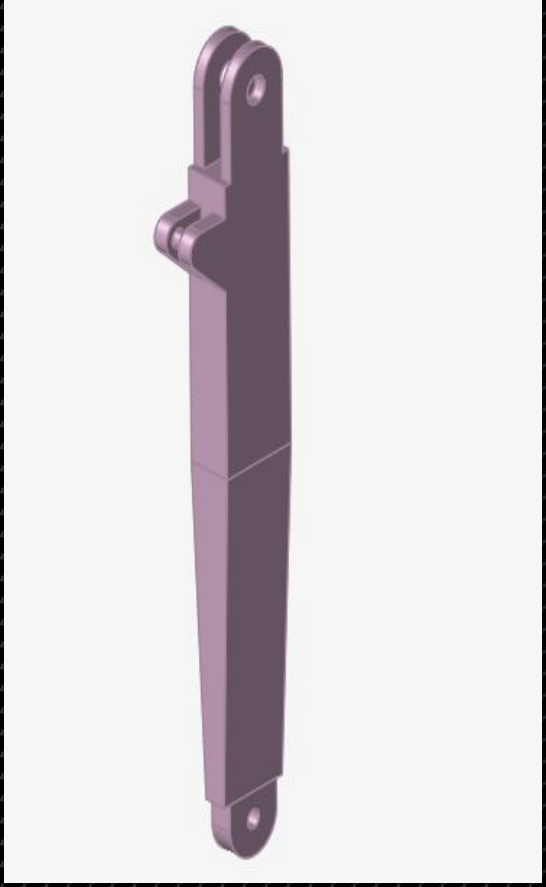




- 허벅지 부위에 해당하는 부품. 무릎 부분의 조인트 구멍, 골반의 조인트 구멍 구현
- A는 허벅지를 감싸는 부품이 들어가는 구멍
- 사용자의 허벅지 길이를 고려하여 설계

2. Initial Modeling-Main parts(Calf part)

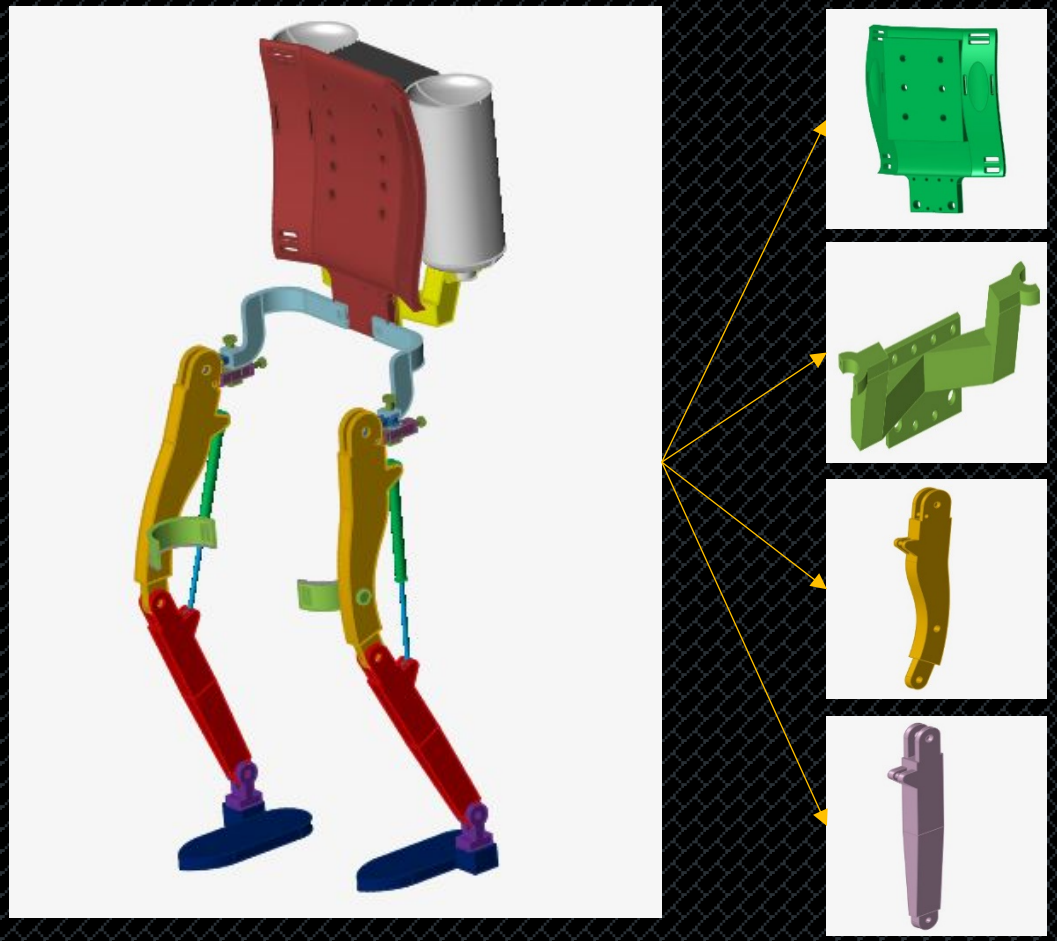




- 정강이 부위에 해당하는 부품. 무릎 조인트 구멍과 발목조인트 구멍 구현
- 사용자의 **정강이 길이를** 고려하여 설계

3 . Formulations & Optimization

3. Formulations-Objective



Objective : 4개의 Main Part에 대한 **경량화**

- 사용자의 피로 경감 목적
- 로봇의 구동 힘 경감 목적

3. Formulations-Cell Support

Requirements :

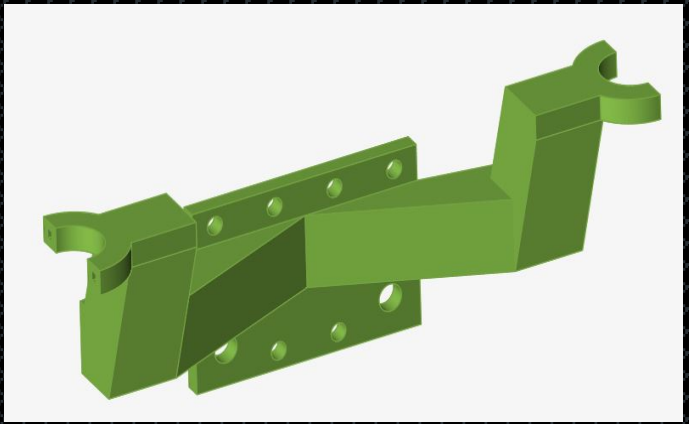
- 11kg 중량의 **산소통 2개를 지지해야** 함

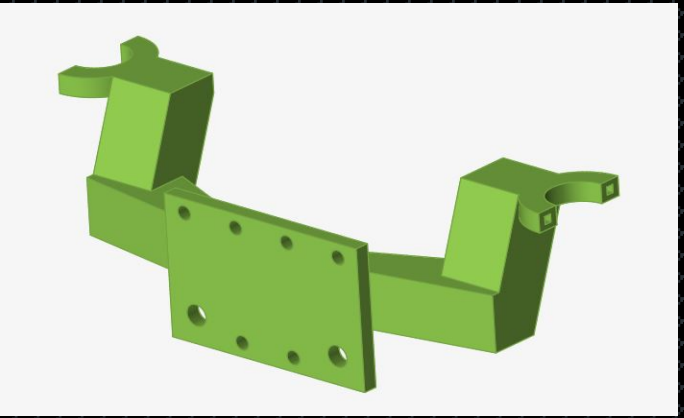
- 최대보행속력(6km/h)으로 보행하는 도중에도 **항복이 일어나면 안됨**

Material :

고탄소강(High Carbon Steel)(E=200Mpa, ρ=7870kg/m3

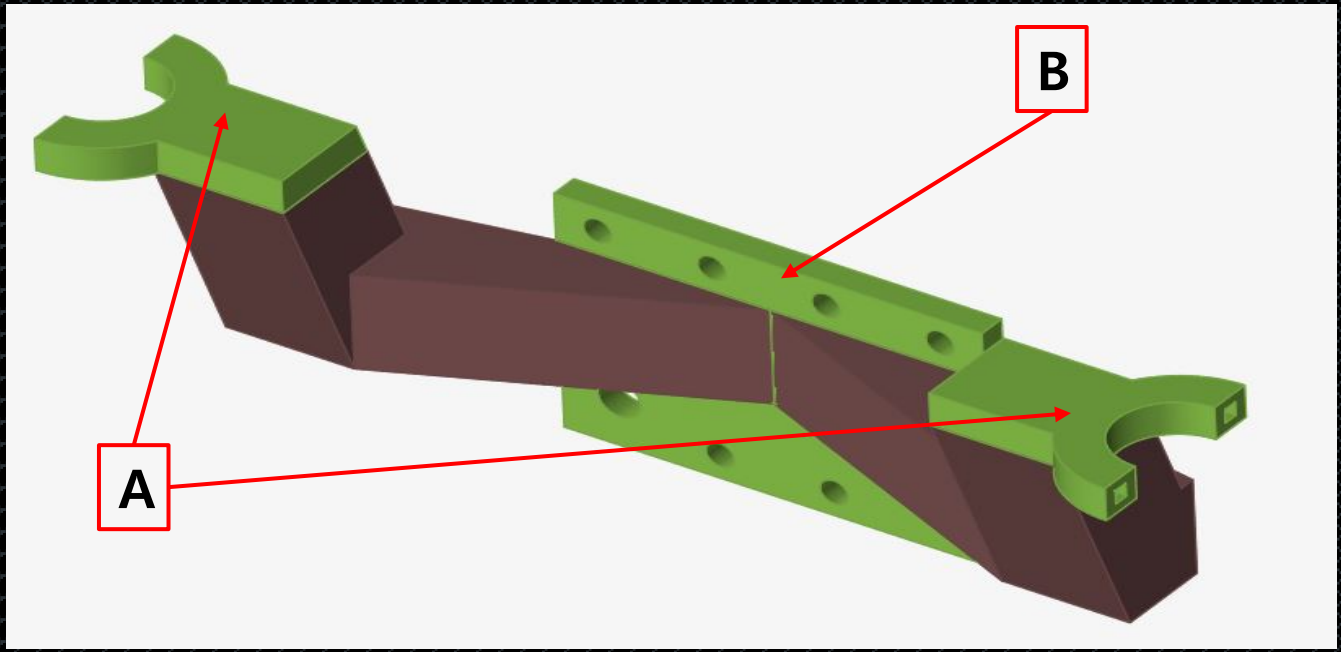
Yield Stress=375Mpa)





3. Formulations-Cell Support

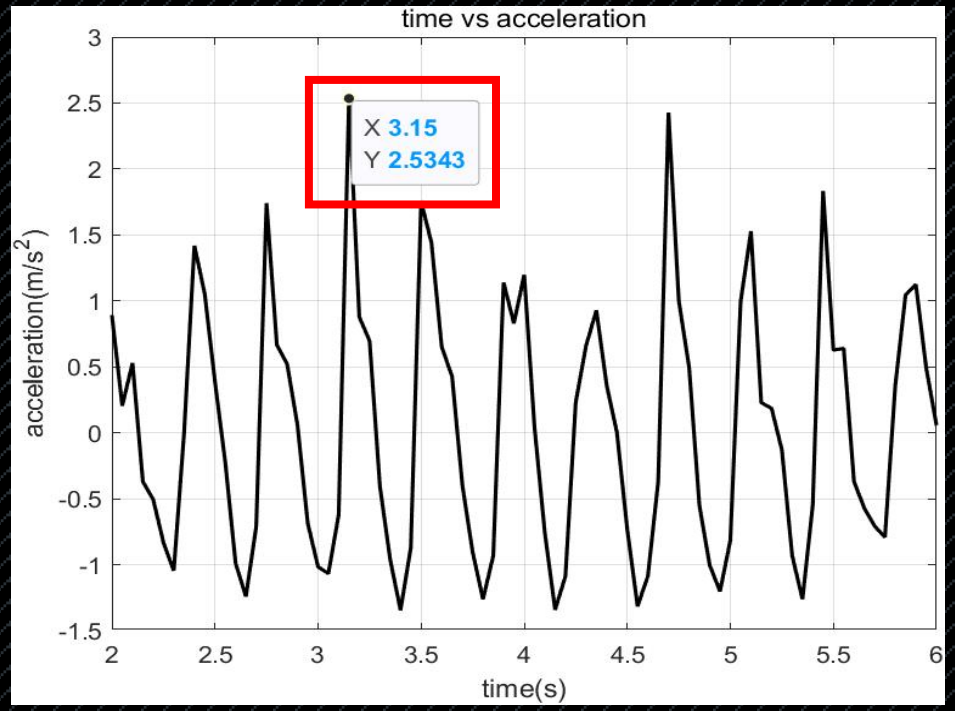
Design Space



- 산소통이 장착되는 부분(A)과 Back에 고정되는 부분(B)을 **제외한 영역을** Design Space로 설정

3. Formulations-Cell Support

하중조건(관성력효과 고려)



- 가속도 측정 app을 이용하여 6km/h로 보행 시 허리춤에서 발생하는 지면과 수직 방향인 **최대 가속도 크기를** 측정. → $a = 2.53 m/s^2$

3. Formulations-Cell Support

하중조건(관성력효과 고려)

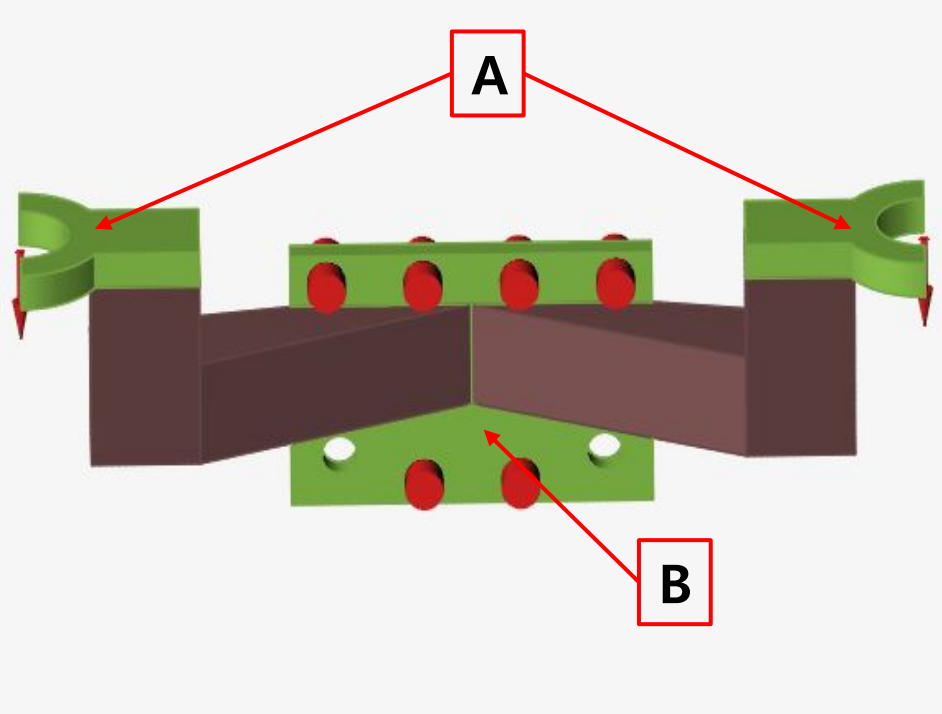
- 이 가속도값(a)를 중력가속도(g)에 더하여 관성력이 **최대로 작용할** 때의 A부분(산소통이 장착되는 부분)이 받는 하중(F) 산출

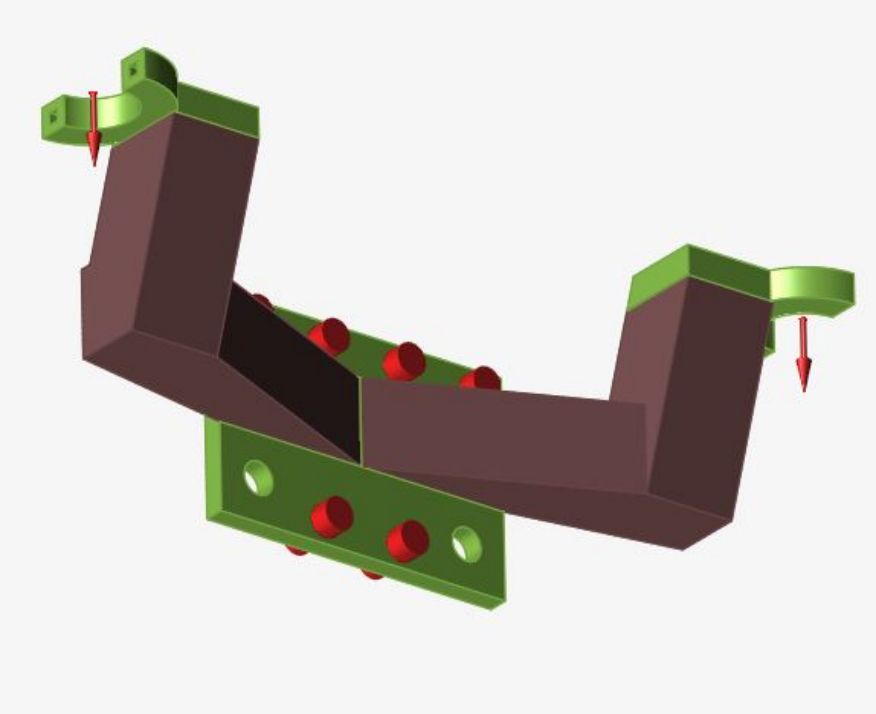
- 산소통의 질량 M=11kg (Global Assumption)
- 중력가속도 $g = 9.8m/s^2$

$$\mathrm{F} = \mathrm{M}(\mathrm{g} + \mathrm{a}) = 11 * (9.8 + 2.53) = 135.6\mathrm{N}$$

3. Formulations-Cell Support

하중조건



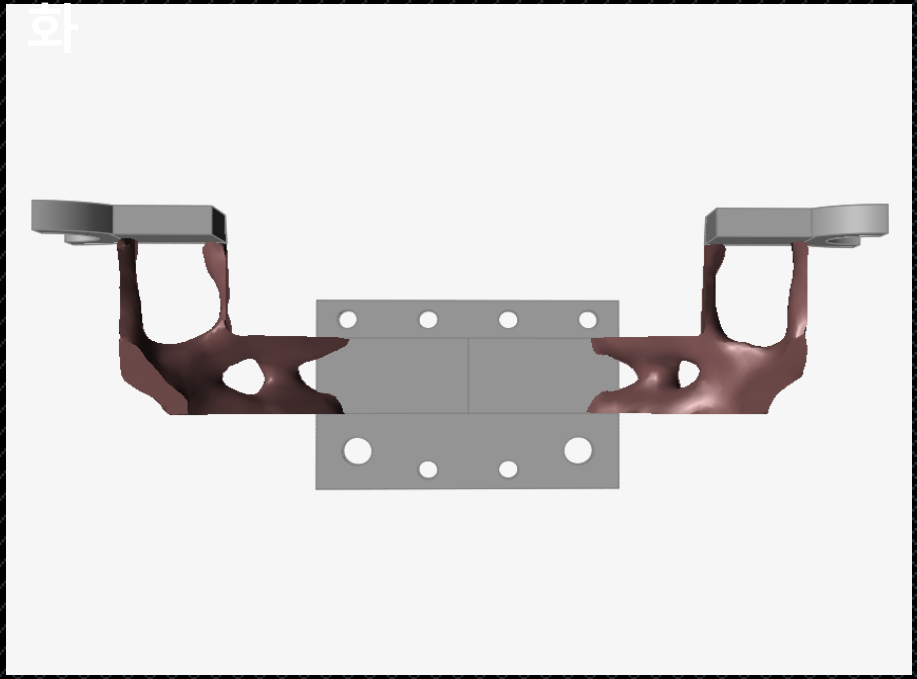


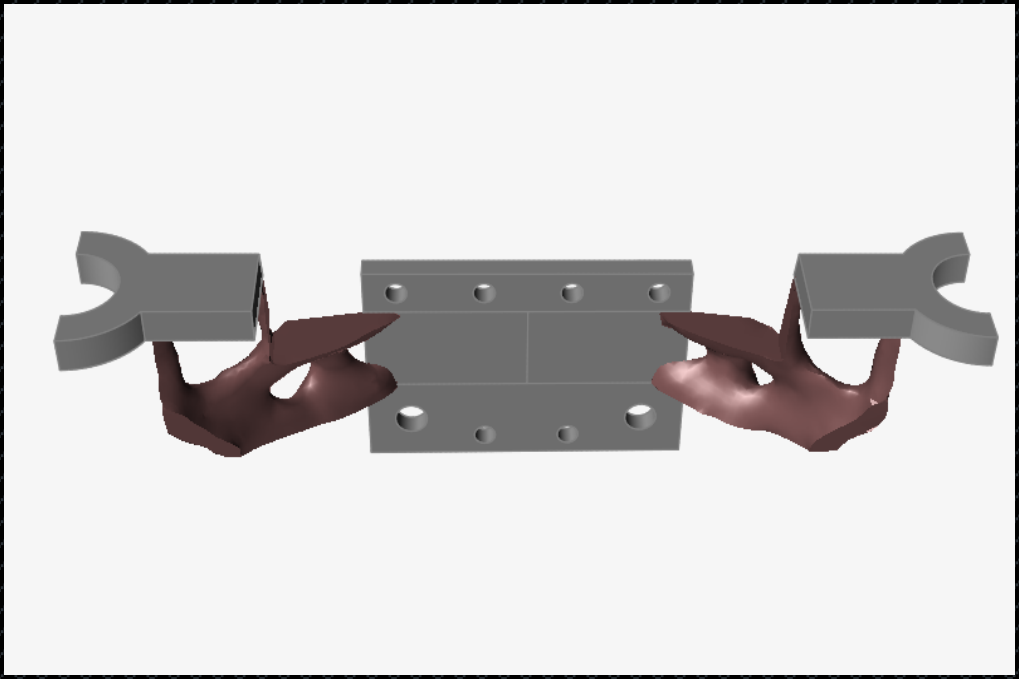
- B 영역에서는 Back과 연결되어 볼트가 들어가는 구멍 6곳을 지지부 적용

- A영역의 산소통과 연결되는 부분은 앞서 산출한 **135.6N 적용**

3. Optimization-Cell Support

위상 최적화



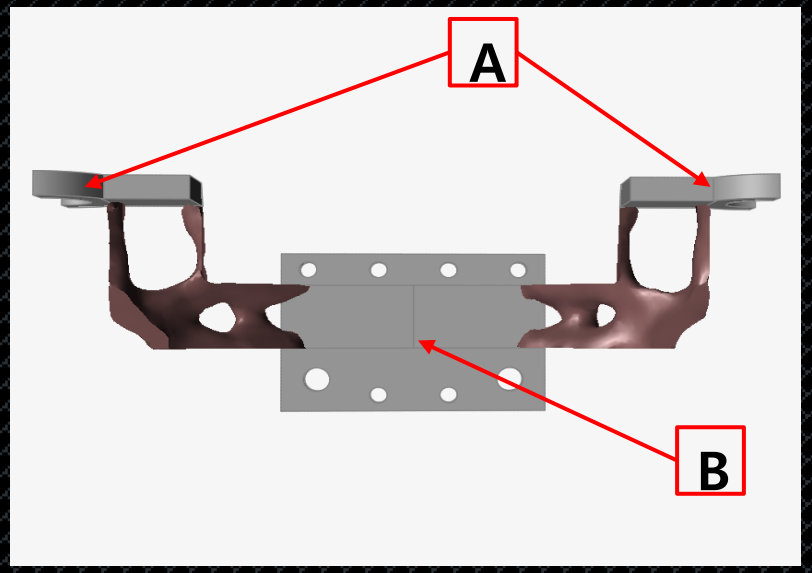


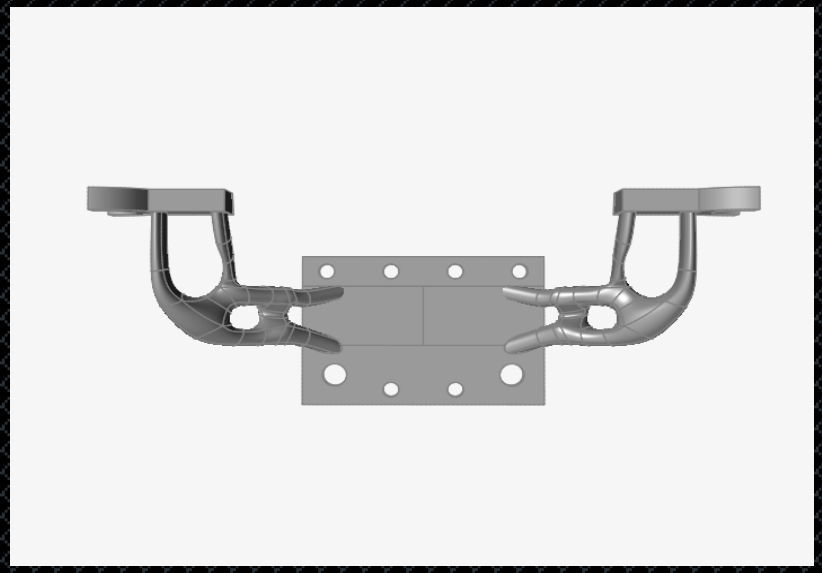
- 디자인 영역 질량 목표 20% 강성 최대화

- POLYNURBS 적용 필요

3. Optimization-Cell Support

PolyNURBS

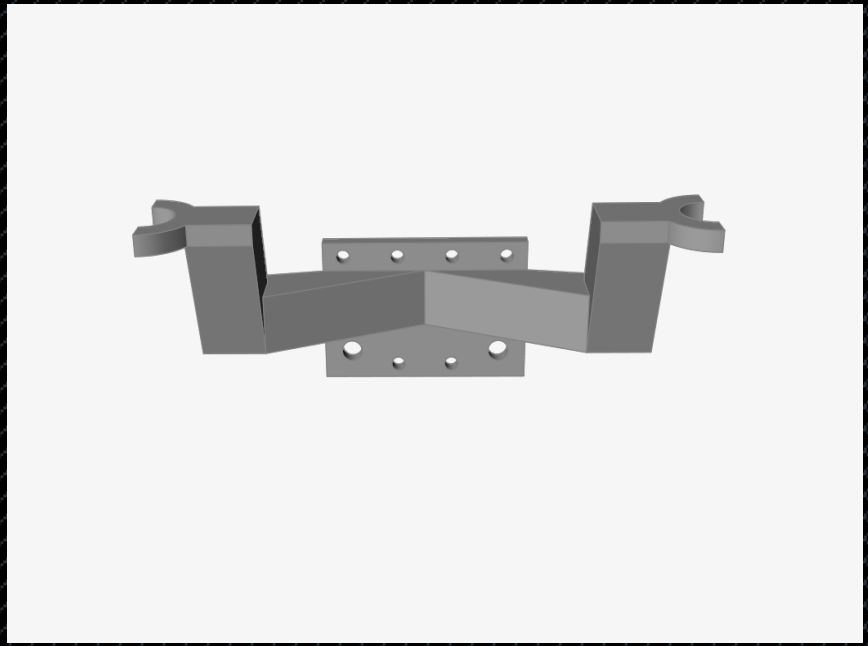




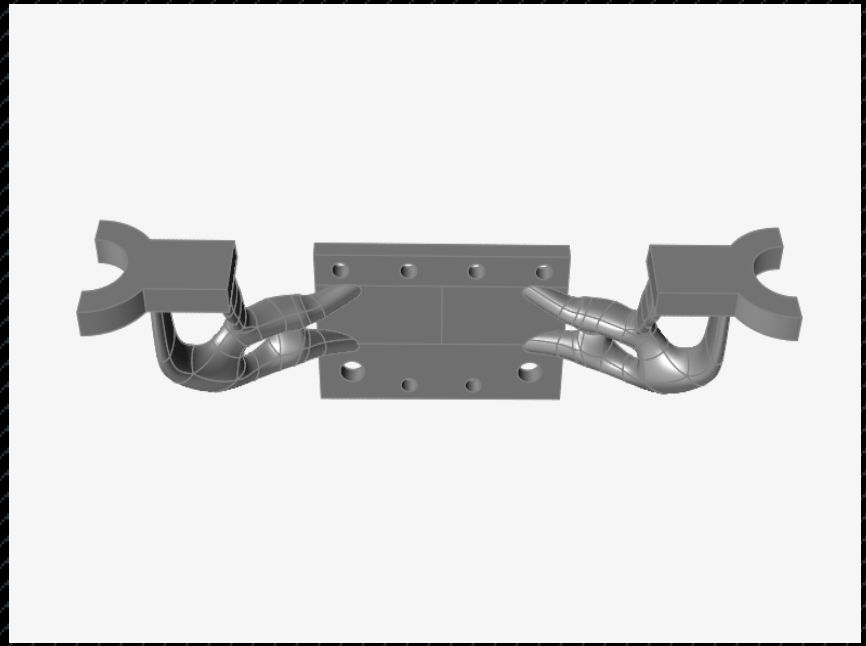
- A, B와 연결되는 부분을 더 두껍게 보완
- 미러를 이용한 대칭형상

3. Optimization-Cell Support

PolyNURBS



6.0 kg



2.8 kg

- 파트 질량 54% 감소

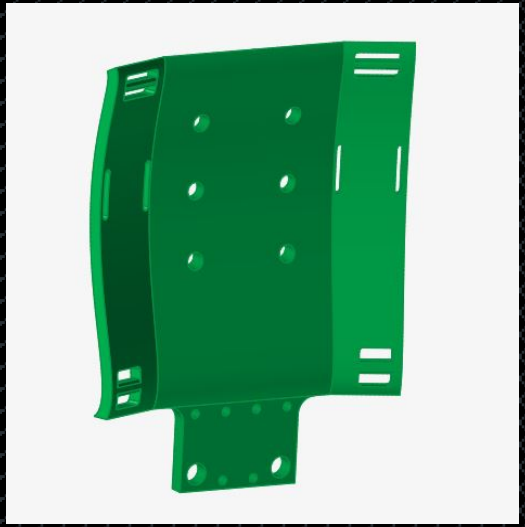
3. Formulations-Back Part

Requirements :

- 산소통이 달린 Cell Support를 지지해야 함
- 파워팩(8kg)을 지지해야 함
- **옆으로 넘어진 상황을 가정하여** 가로 방향 양쪽으로 10kgf의 하중이 가해져도 안전해야 함
- 최대보행속력(6km/h)으로 보행하는 도중에도 항복이 일어나면 안됨

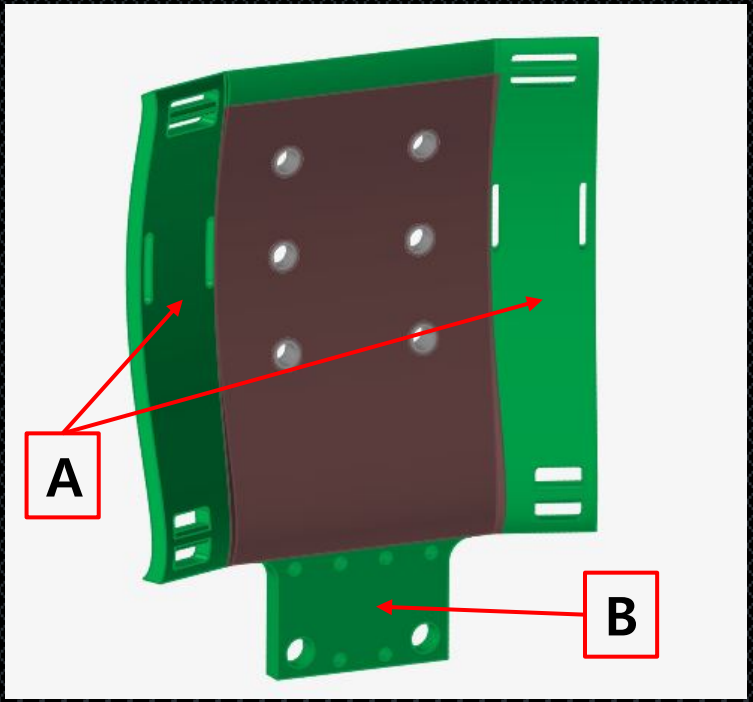
Material :

- 알루미늄 (7075-T6)



3. Formulations-Back Part

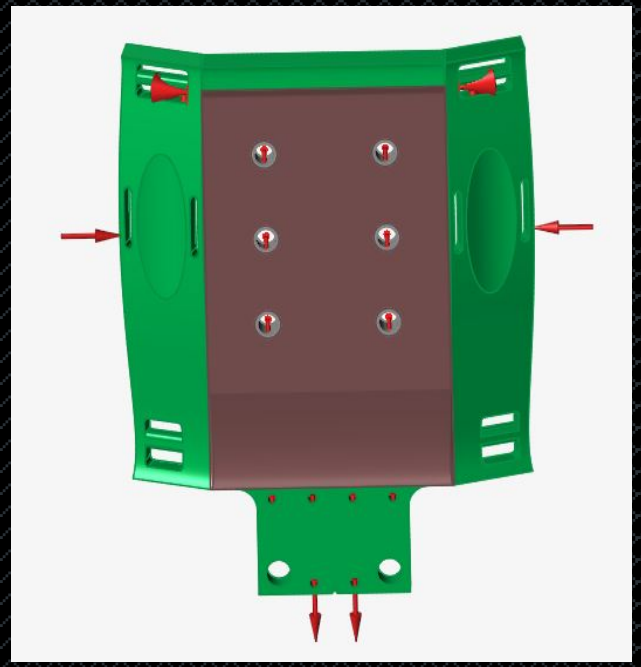
Design Space

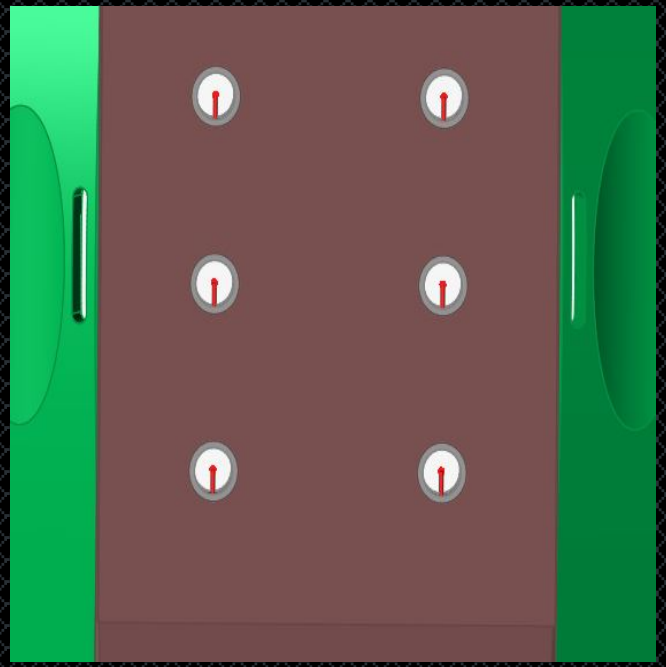


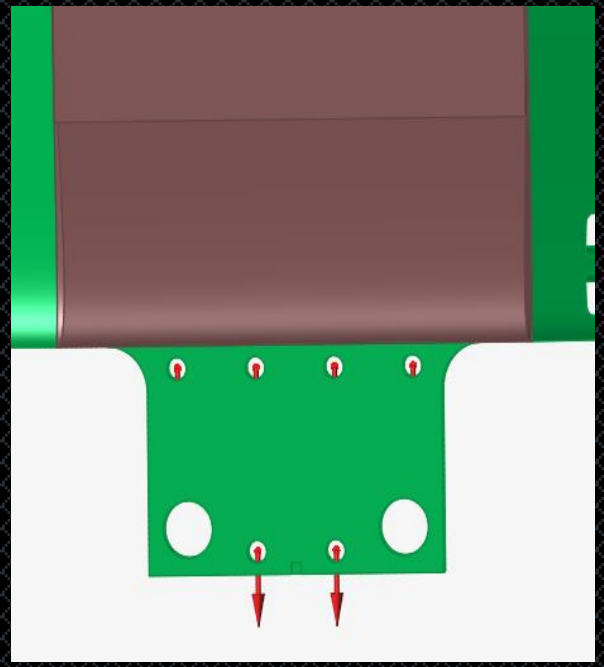
- 어깨끈구멍 , 산소통 고정벨트 구멍, 복부 고정벨트구멍 등의 복잡한 형상이 있는 A영역은 디자인 영역에서 제외
- Cell Support가 장착되는 B영역도 제외

3. Formulations-Back Part

하중조건



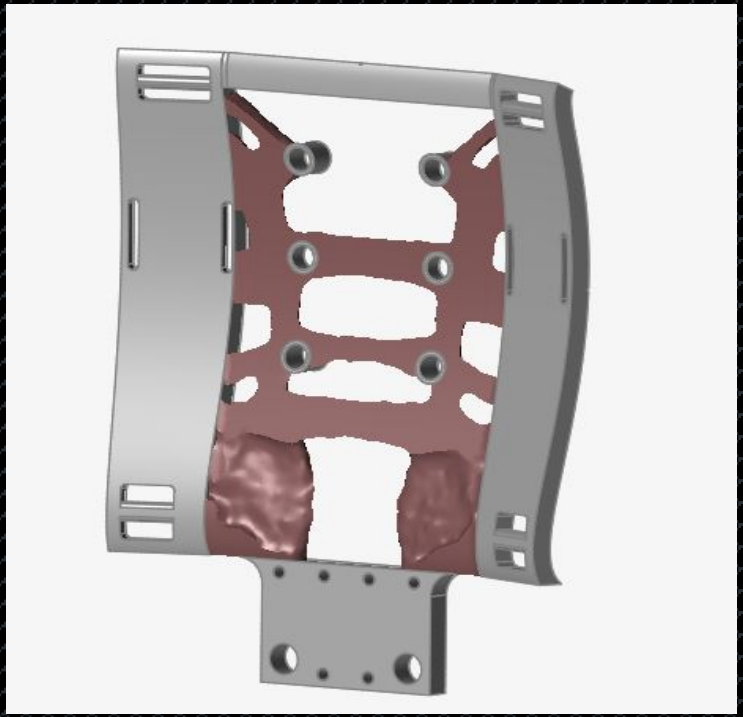




- 어깨 끈 부분을 지지대로 설정
- 가로 방향 양옆으로 120N의 하중을 적용
- Cell Support가 들어가는 6개 구멍에 최적화 후의 Cell Support무게(2.77kgf)+관성력을 나누어 적용
- 파워팩이 들어가는 6개의 구멍에는 8kgf+관성력을 나누어 적용 (Cell Support에서와 동일한 가정)

3.Optimization-Back Part

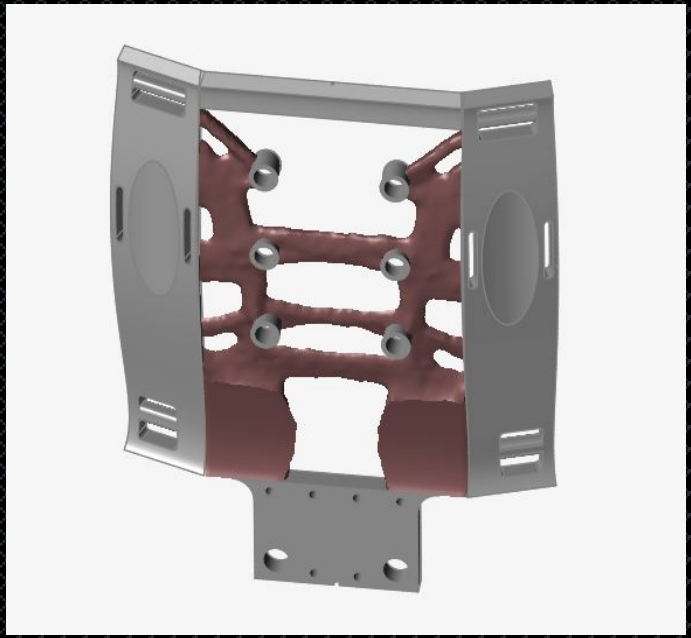
위상 최적화

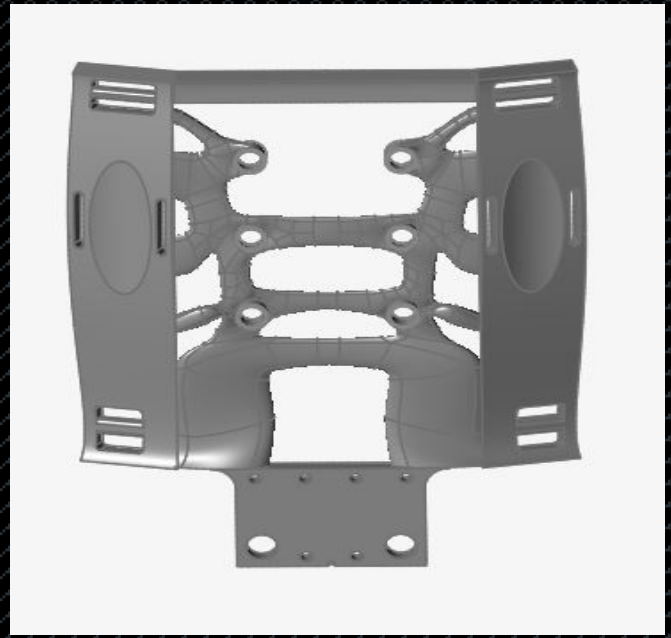


- 디자인영역 질량 목표 20% 강성최대화
- POLYNURBS 적용 필요

3. Optimization-Back Part

PolyNURBS

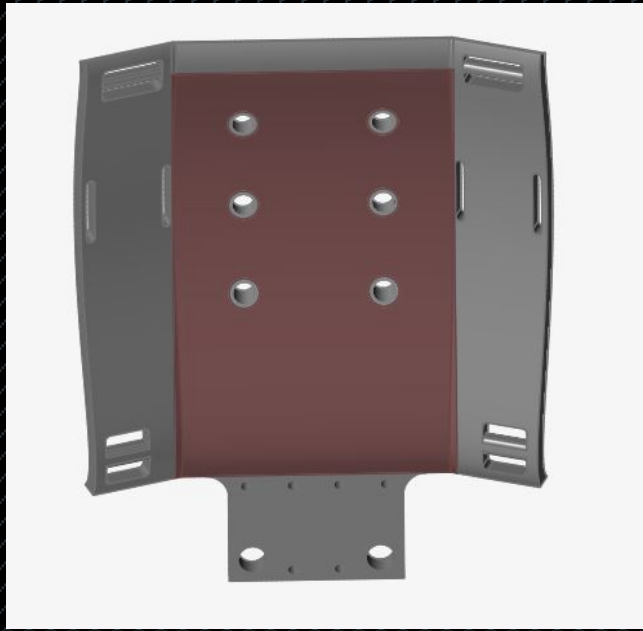




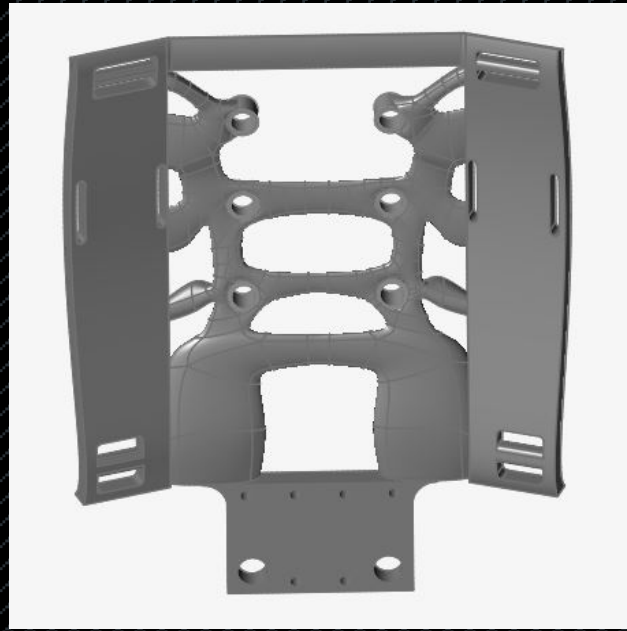
- 분할한 구멍들을 확실하게 지지하도록 보완
- **초기설계의 S-Curve**가 최대한 유지되도록 함

3. Optimization-Back Part

PolyNURBS



8.4 kg

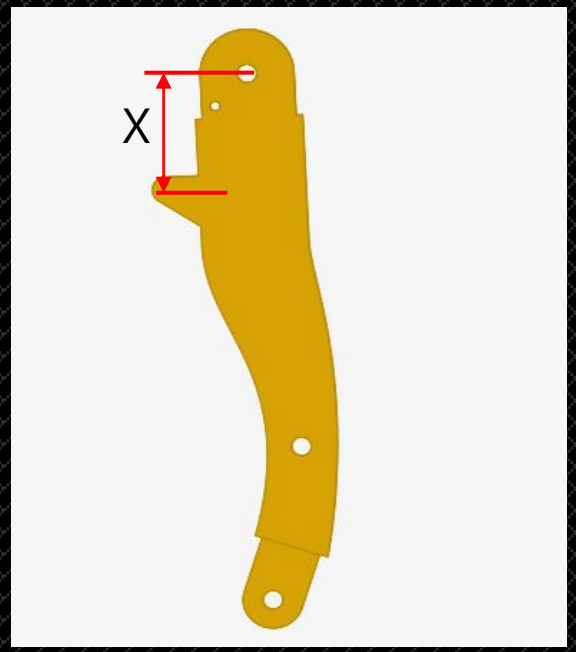


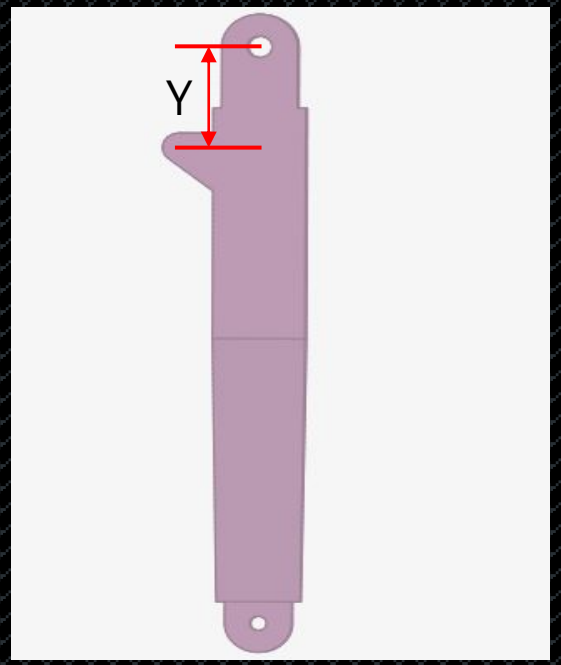
4.8 kg

- 파트 질량 43% 감소

3. Formulations-Thigh part & Calf part

액츄에이터 부착위치 최적화



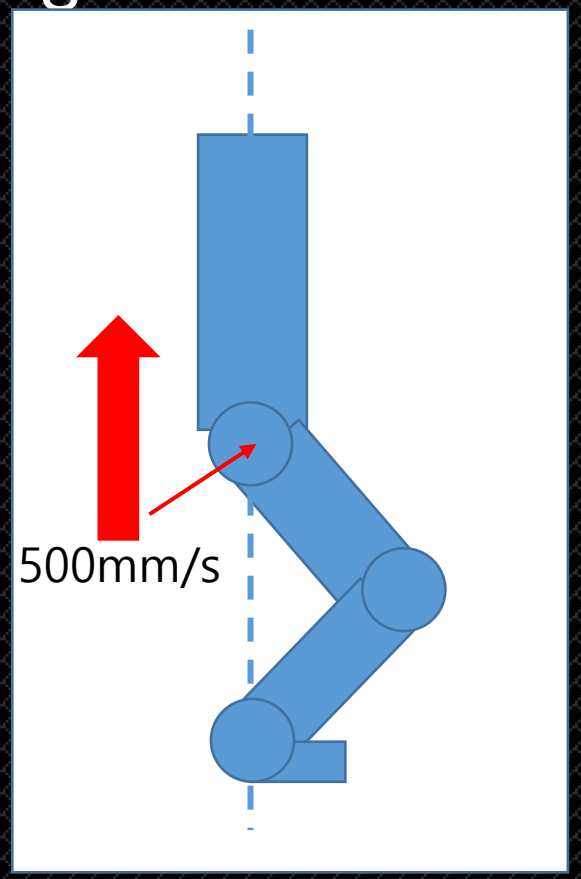


- 허벅지 파트와 정강이 파트에서 액츄에이터가 부착될 위치 X, Y를 결정

- **같은 모션 상황에서** 액츄에이터에 가장 **하중부담이 적은 모델을** 찾기로 함

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요



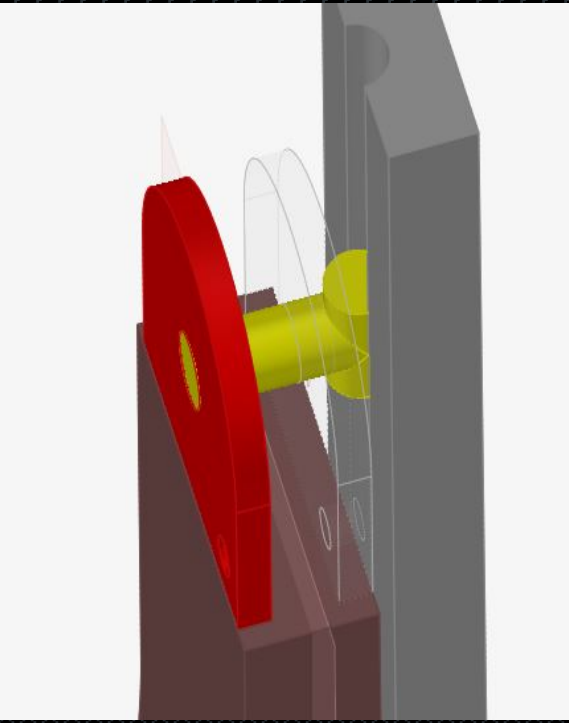
어떤 모션인가?

- 측면에서 보았을 때 골반의 중심과 발목을 이은 선이 지면과 수직

- 앉은 상태에서 골반속력 500mm/s의 일정한 속도로 일어나는 동작

3. Formulations-Thigh part & Calf part

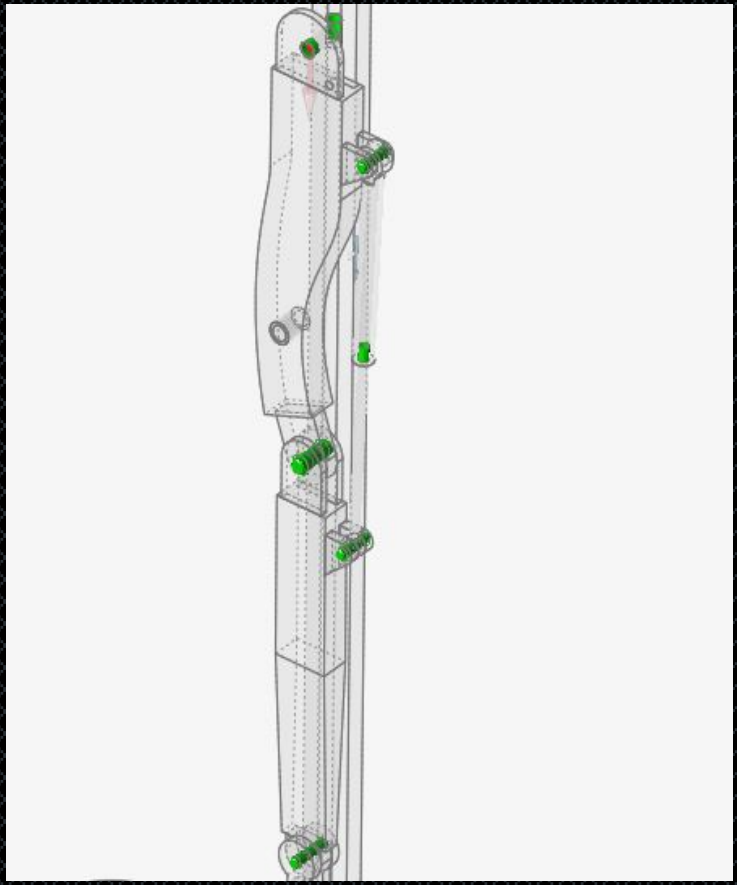
모션해석의 개요



- 다리 한 쪽을 모델링
- 앞서 정의한 동작이 이루어 질 수 있도록 레일을 이용하여 구조적으로 구속
- 액츄에이터에 변위를 주어 동작이 일어나게 함

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요(조인트)

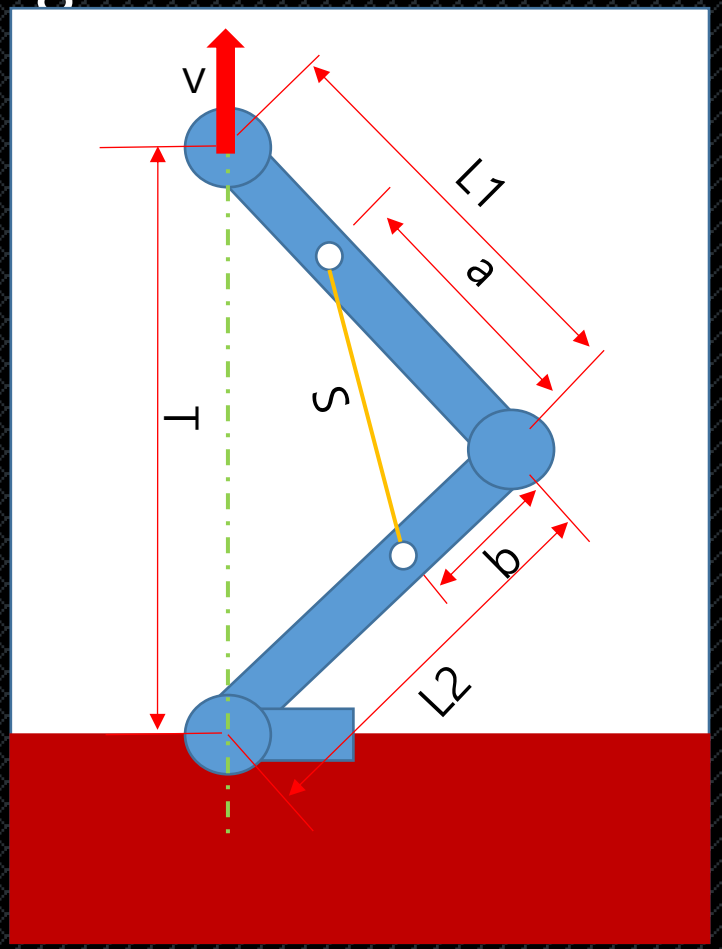


- 무릎, 발목 부위 및 액츄에이터 연결부는 **핀 조인트 적용**

- 골반부, 레일 연결부, 액츄에이터 내부는 **원통형 슬라이딩 조인트 적용**

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개



액츄에이터의 변위 데이터 산출

L_1, L_2, T_1, v 는 상수

$$T^2 = 2L_1L_2cos\theta - L_1^2 - L_2^2$$

$$2T\dot{T} = -2L_1L_2\dot{\theta}sin\theta \quad \Rightarrow \quad \dot{\theta}sin\theta = -\frac{T\dot{T}}{L_1L_2} = -\frac{Tv}{L_1L_2} \qquad (1)$$

$$S^2 = 2abcos\theta - a^2 - b^2$$

$$2S\dot{S} = -2ab\dot{\theta}sin\theta \quad \Rightarrow \quad S\dot{S} = -ab\dot{\theta}sin\theta \qquad (2)$$

식 (1)을 (2)에 대입, $S\dot{S} = \frac{abTv}{L_1L_2}$ $\quad T = T_1 + vt$

$$S\dot{S} = \frac{ab(T_1 + vt\ )v}{L_1L_2} \quad \xrightarrow{\int} \quad S^2 = \int \frac{2ab(T_1 + vt\ )v}{L_1L_2}dt$$

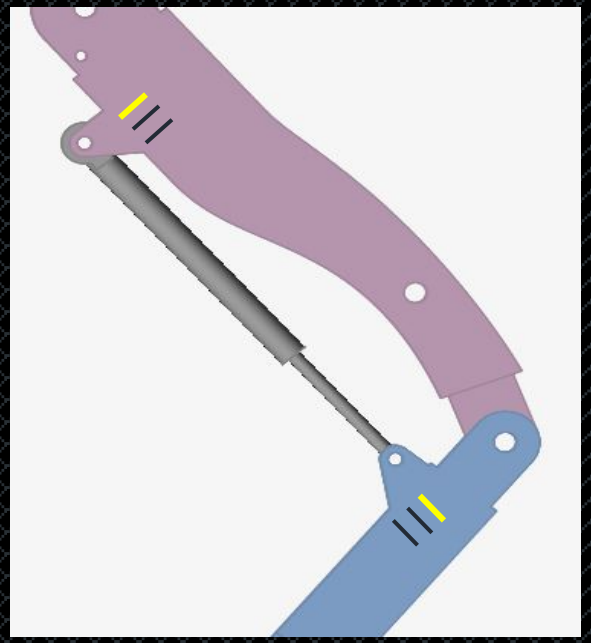
$$\boldsymbol{S = \sqrt{\frac{2abvT_1}{L_1L_2}t + \frac{abv^2}{L_1L_2}t^2 + 280^2}}$$

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요

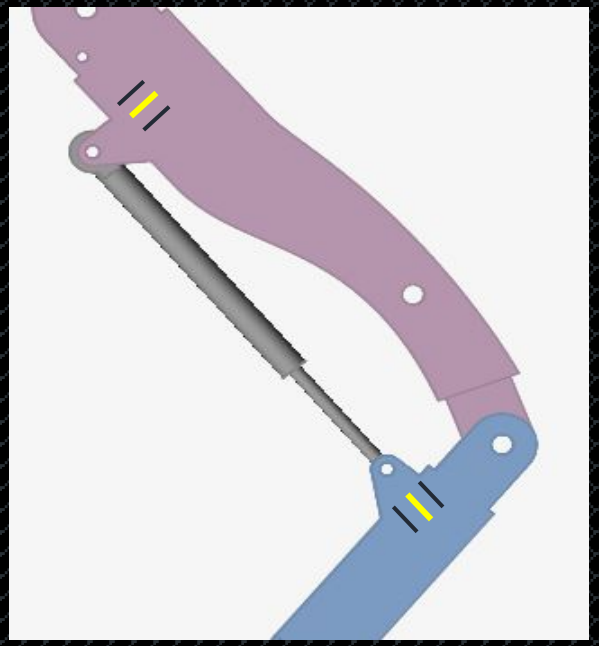
$$S = \sqrt{\frac{abvT_1}{L_1L_2}t + \frac{1}{2}\frac{abv^2}{L_1L_2}t^2 + 280^2}$$

$$T_1 = 435mm, L_1 = 420mm, L_2 = 400mm, v = 500mm/s$$



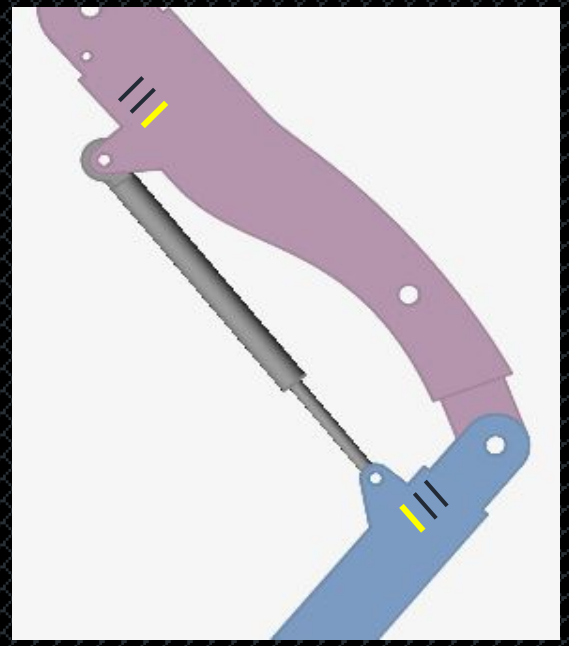
CASE1

a=345mm, b=55mm



CASE2

a=338mm, b=62mm



CASE3

a=330mm, b=70mm

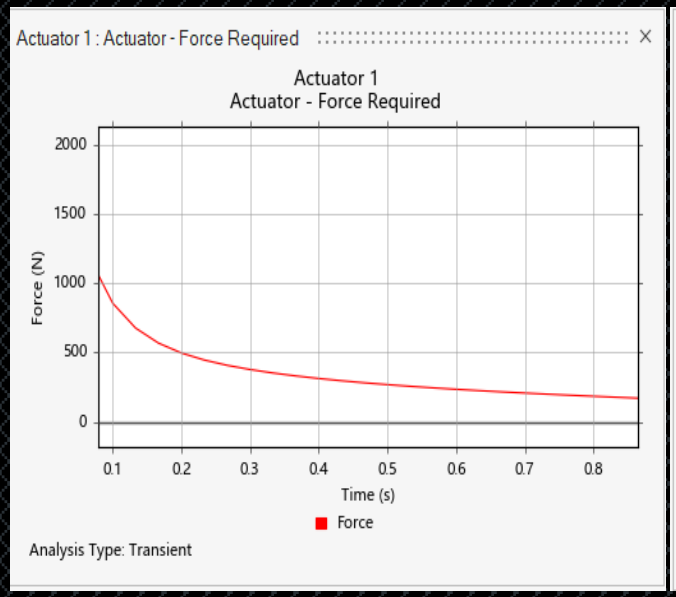
3. Formulations-Thigh part & Calf part

케이스별 액츄에이터 구동 힘

$$S = \sqrt{\frac{abvT_1}{L_1L_2}t + \frac{1}{2}\frac{abv^2}{L_1L_2}t^2 + 280^2}$$

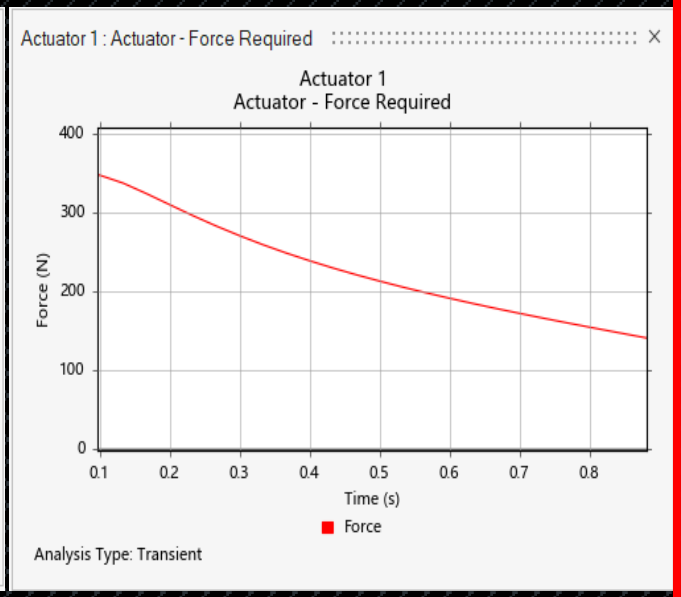
$T_1 = 435, L_1 = 420mm, L_2 = 400, v = 500mm/s$

Step Size= 0.005, 0~1.1s



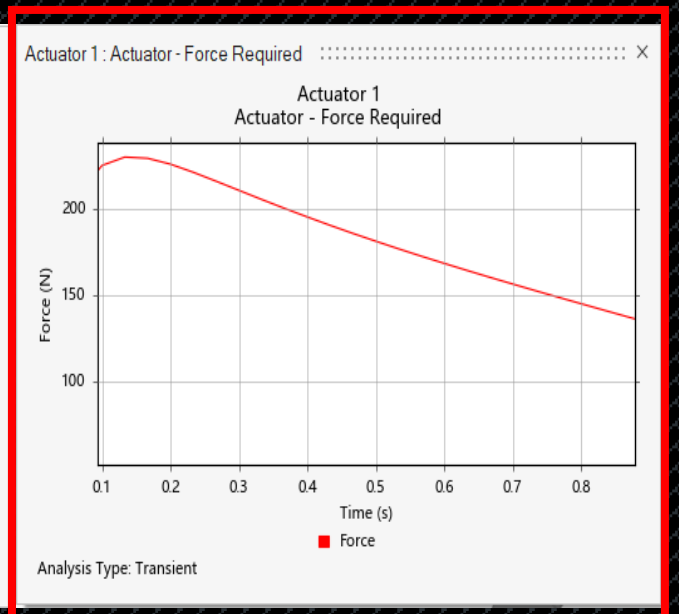
CASE1

F_{ave} = 291.51N



CASE2

F_{ave} = 219.57N

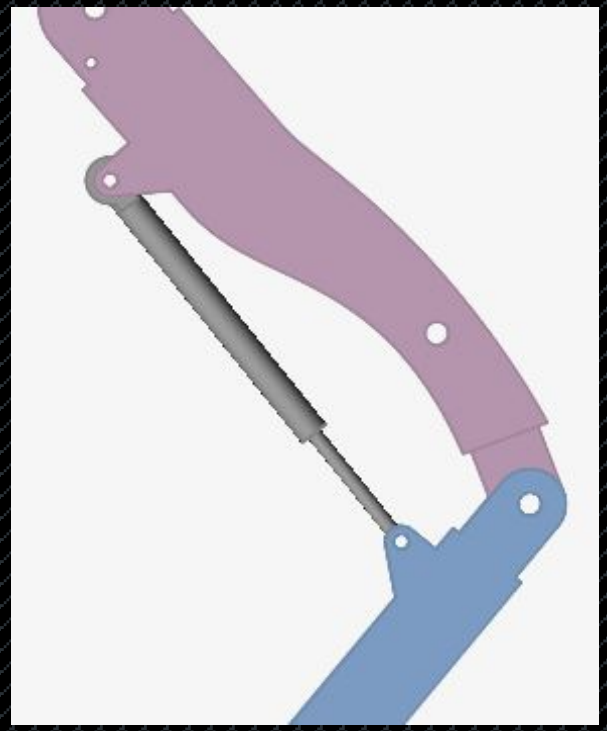


CASE3

F_{ave} = 178.04N

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요



CASE3

a=330mm, b=70mm

평균 구동힘이 가장 적게 들어가는

CASE3를 선정!

3. Formulations-Thigh part & Calf part

Requirements :

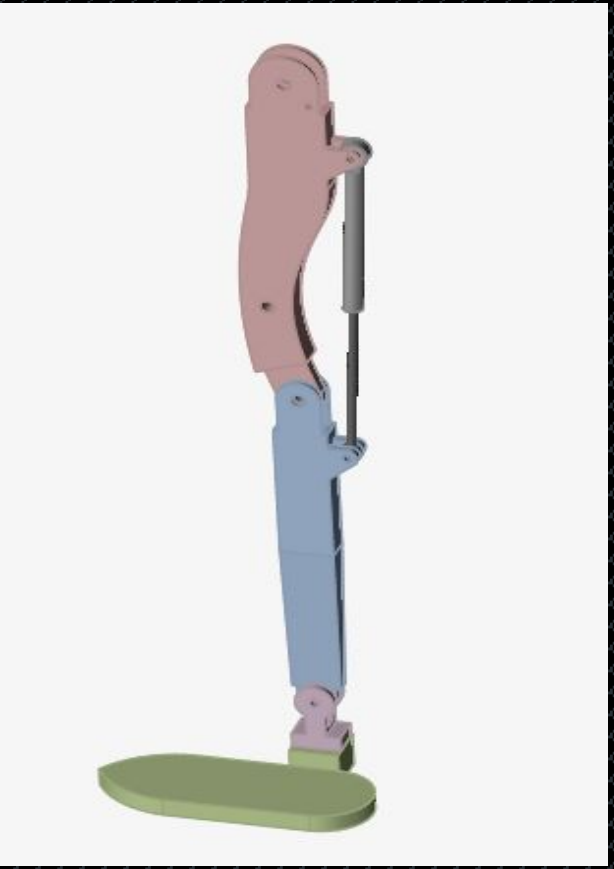
- 가반하중 30kg+상체부품들의 하중을 사용자의 근력 도움 없이 한발로도 지탱 가능해야 함

- 동작을 하는 와중에 항복이 일어나서는 안됨

→ **대표적인 모션으로 스쿼트 동작을 채택**

Material :

- 고탄소강 (High Carbon Steel)



- 스쿼트 동작을 할 때에 각 조인트에서의 힘의 방향이 계속해서 바뀌어서 정적해석이 어려우므로, **모션해석을 이용한 최적화를 진행하기로 결정**

3. Formulations-Thigh part & Calf part

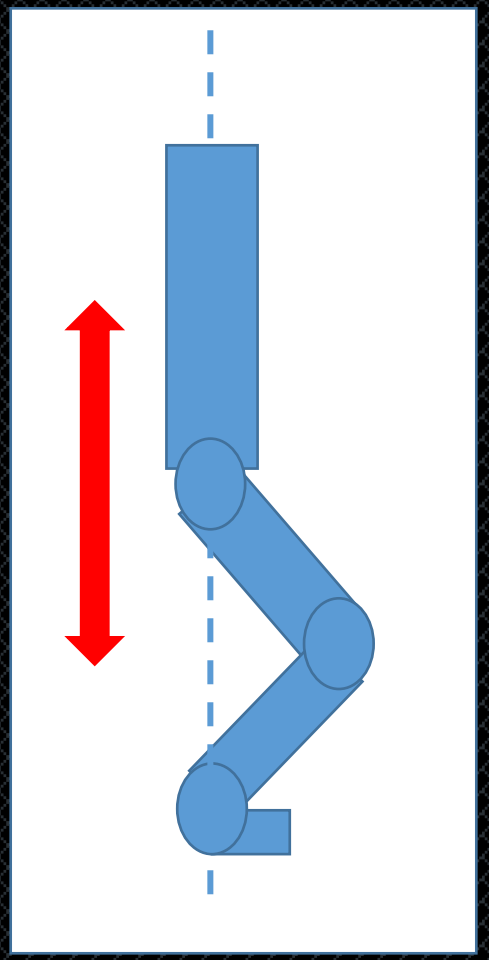
Design Space

- 허벅지 파트의 경우 골반과 이어지는 **조인트, 무릎 조인트, 액츄에이터 조인트, 허벅지 고정대가 들어가는 구멍을** 제외한 부분을 디자인 영역으로 선정

- 종아리 파트의 경우 **무릎 조인트, 액츄에이터 조인트, 발목 조인트를** 제외한 부분을 디자인 영역으로 선정

3. Formulations-Thigh part & Calf part

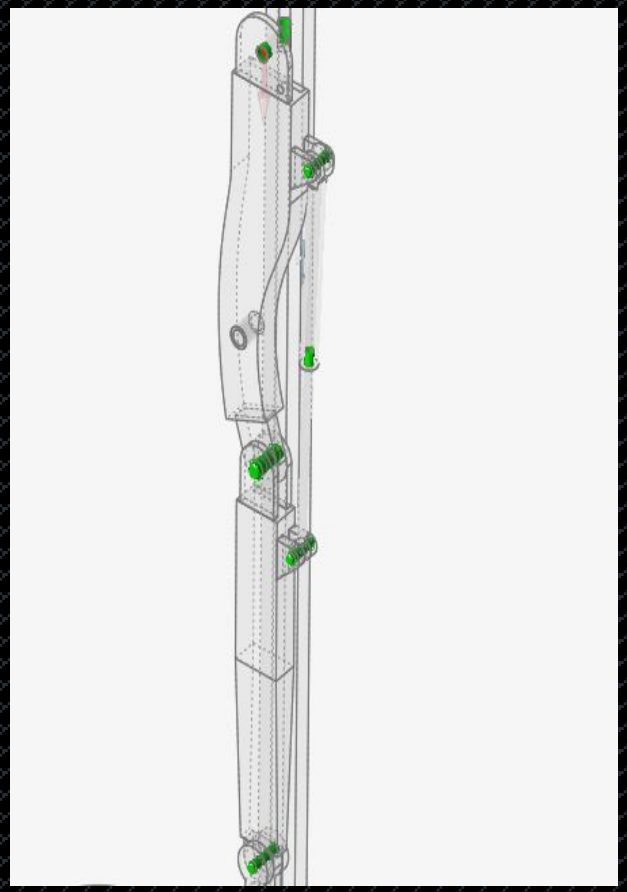
스쿼트 동작의 정의

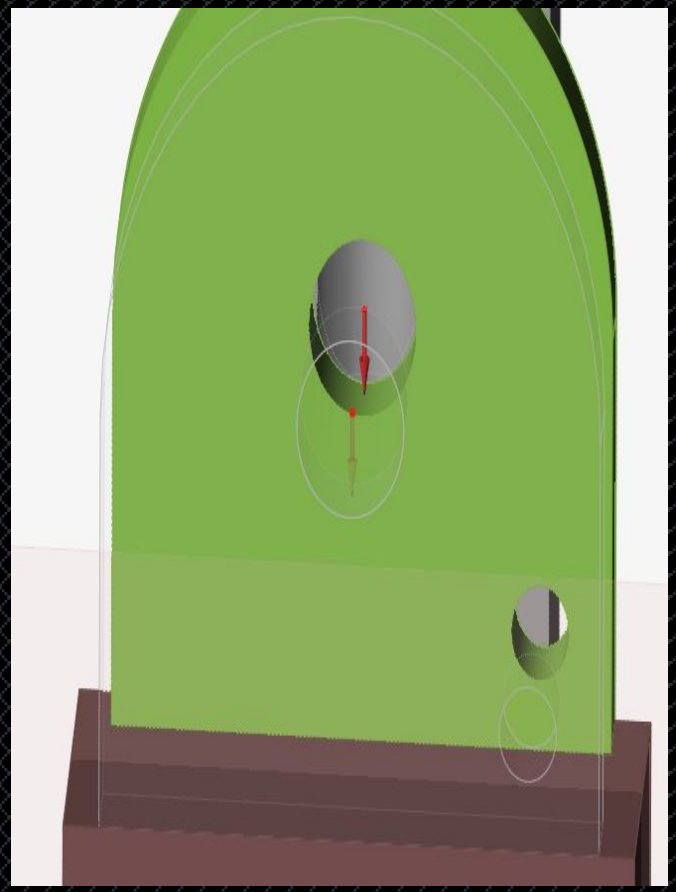


- 측면에서 보았을 때 골반의 중심과 발목을 이은 선이 지면과 수직
- 앉기 시작해서 완전히 일어나는 데 까지 걸리는 시간이 약 2.8초
- 발은 정면을 향하고 서로 평행
- 양쪽 다리는 완벽한 대칭으로 움직임

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요(조인트 및 하중조건)





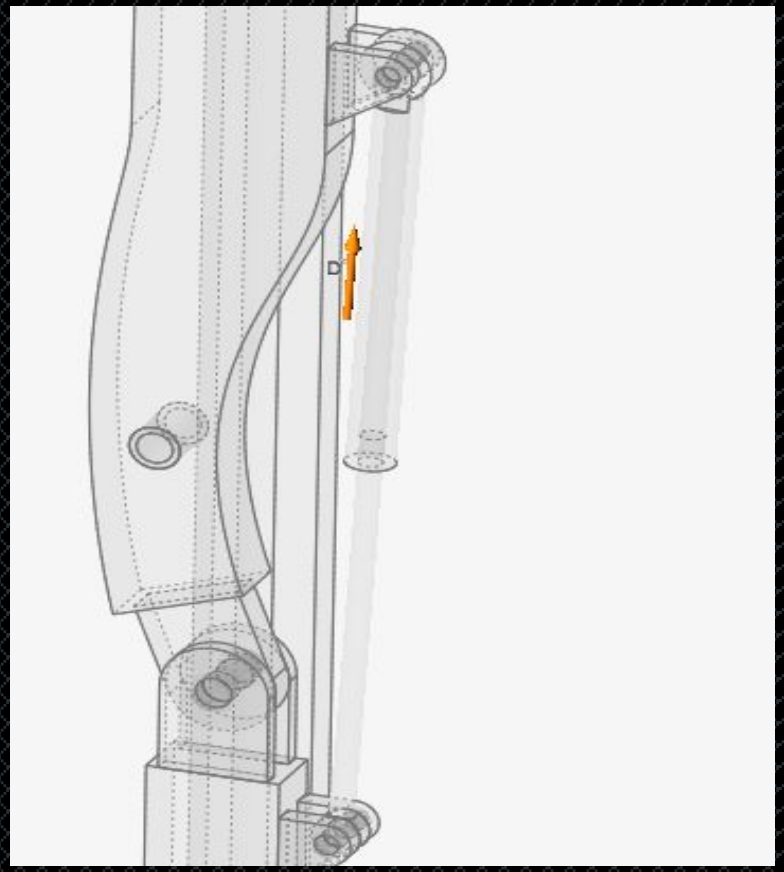
- 무릎, 발목 부위 및 액츄에이터 연결부는 **핀 조인트 적용**

- 골반부, 레일 연결부, 액츄에이터 내부는 **원통형 슬라이딩 조인트 적용**

- 하중조건은 back과 cell support의 무게를 합한것을 2로 나누고 가반하중 30kgf를 더하여 적용 (147N)

3. Formulations-Thigh part & Calf part

모션해석의 개요(액츄에이터 변위조건)



- 단순히 sinusoidal, Linear 하게 액츄에이터의 변위를 주었을 때는 실제 스쿼트 동작에서의 속도, 가속도 정보를 반영하기 어려움

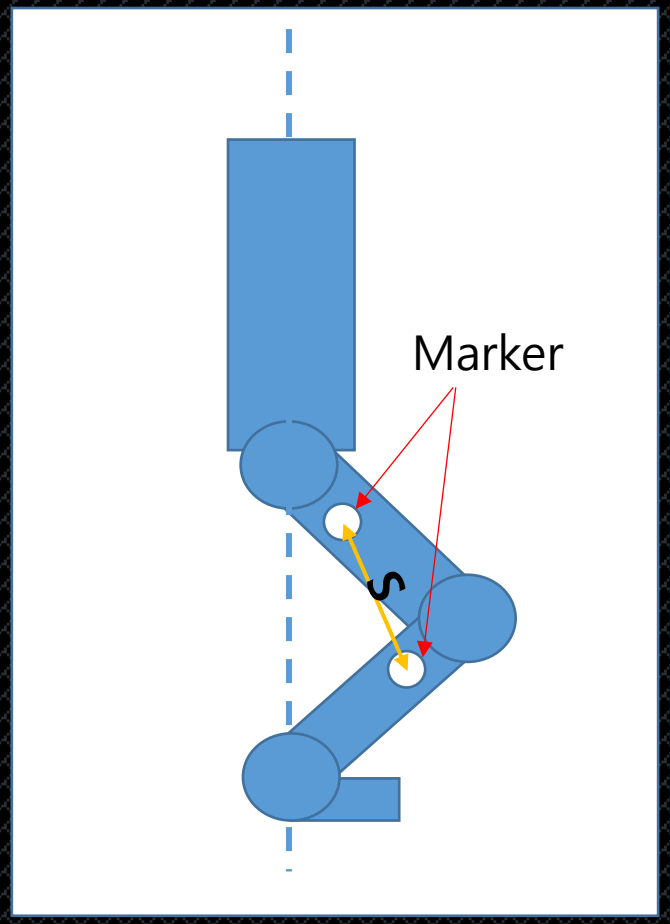
- 로봇이 인간의 동작을 완벽히 따른다는 가정

➡ **스쿼트 모션의 운동학적 분석**

➡ **분석을 통해 얻은 데이터를 활용**

3. Formulations-Thigh part & Calf part

운동학적 분석방법



1. 액츄에이터가 위치하는 부위에 마커를 부착

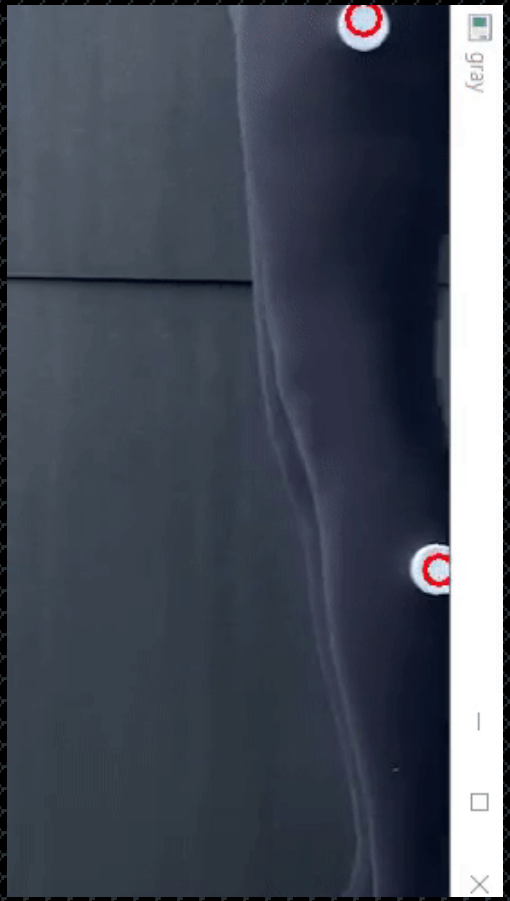
2. OpenCV를 활용하여 두 마커의 위치 값을 픽셀단위로 계산

3. 두 위치 값을 이용, 마커 사이의 시간 별 거리 S를 계산 이후 실제 거리 데이터로 **칼리브레이션**

→ 액츄에이터의 변위 데이터로 활용

3. Formulations-Thigh part & Calf part

운동학적 분석



- 허벅지 마커의 시간 t_i에서의 위치를 (x_{T_i}, y_{T_i}) , 종아리 마커의 위치를 (x_{C_i}, y_{C_i})라고하면

$$S_i = \sqrt{(x_{T_i} - x_{C_i})^2 + (y_{T_i} - y_{C_i})^2}$$

- S_i 데이터를 얻은 후 보정계수를 곱함

- Inspire의 액츄에이터의 변위 데이터로 넣기위해 시간 t_i도 같이 CSV로 저장

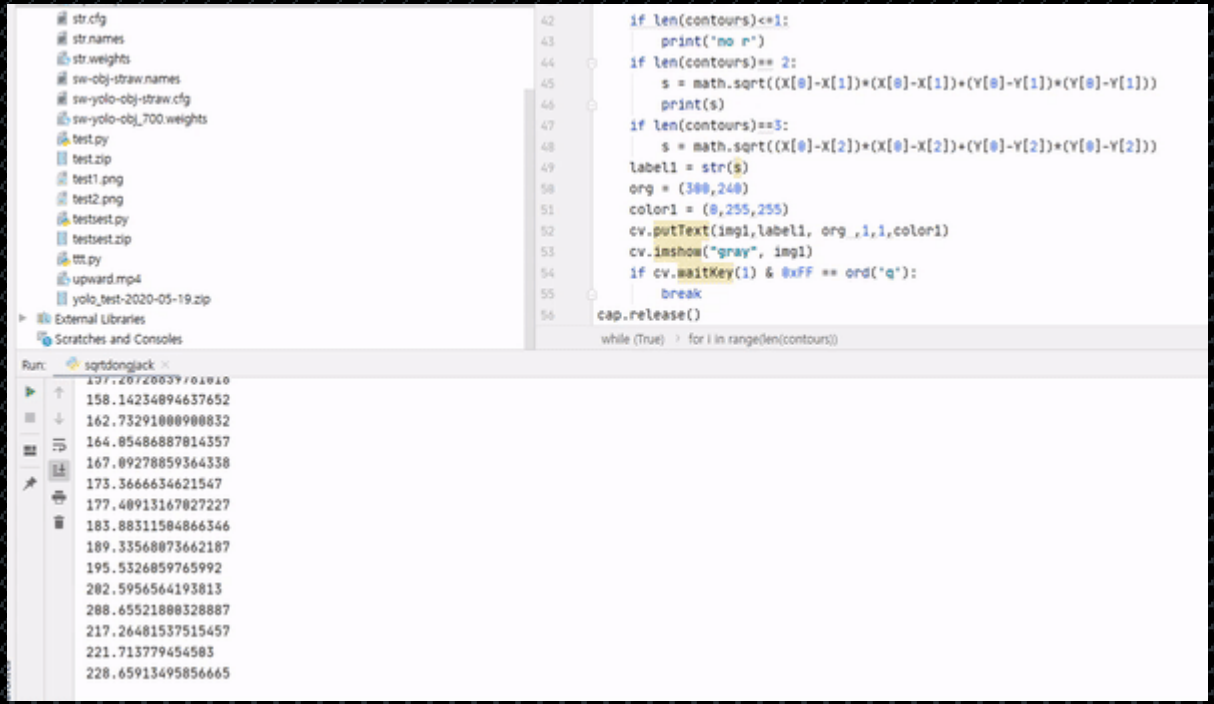
OpenCV

CSV

Inspire™

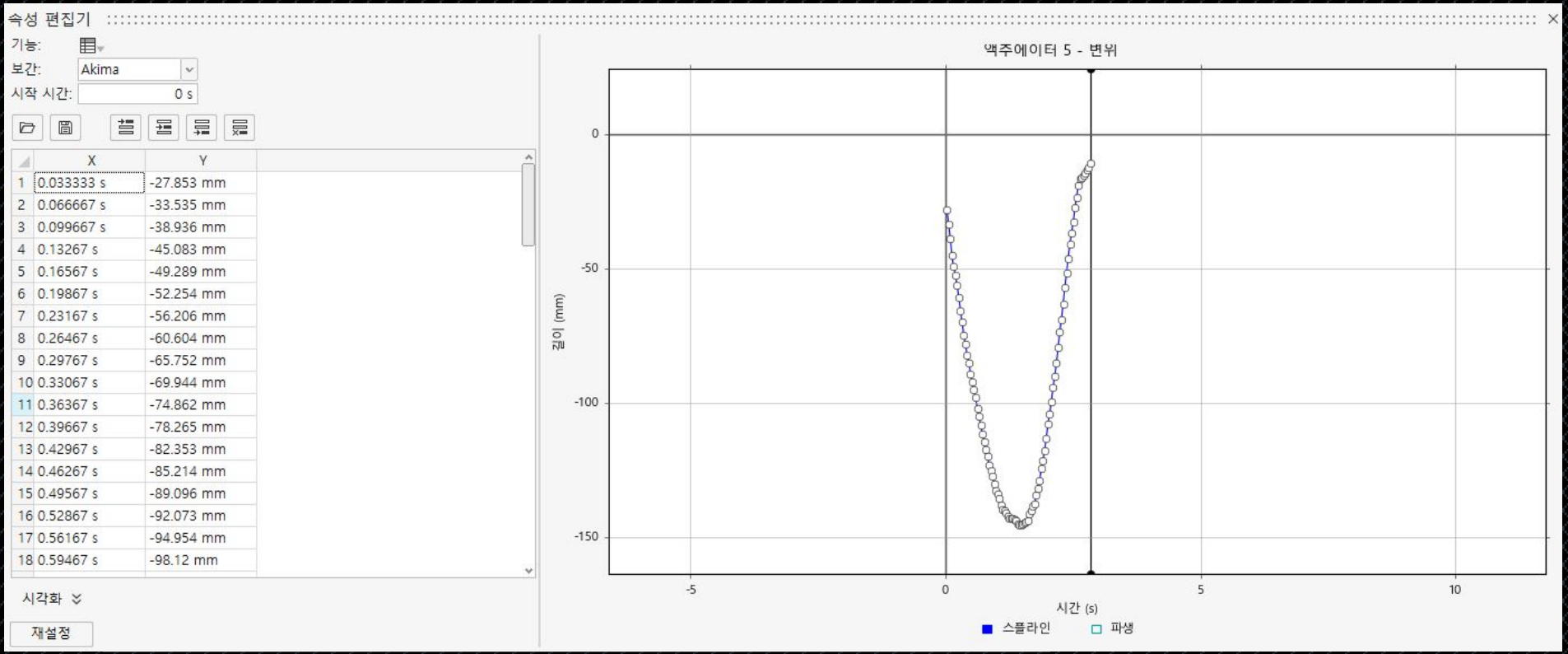
3. Formulations-Thigh part & Calf part

데이터 추출예시



3. Formulations-Thigh part & Calf part

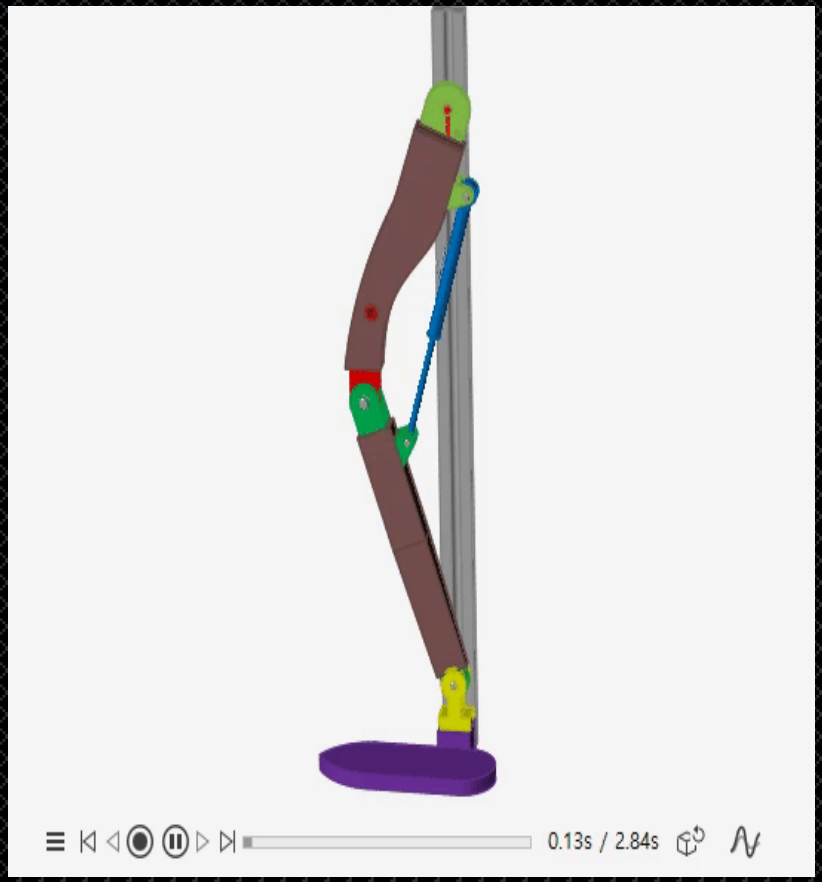
데이터 예시



	X	Y
1	0.033333 s	-27.853 mm
2	0.066667 s	-33.535 mm
3	0.099667 s	-38.936 mm
4	0.13267 s	-45.083 mm
5	0.16567 s	-49.289 mm
6	0.19867 s	-52.254 mm
7	0.23167 s	-56.206 mm
8	0.26467 s	-60.604 mm
9	0.29767 s	-65.752 mm
10	0.33067 s	-69.944 mm
11	0.36367 s	-74.862 mm
12	0.39667 s	-78.265 mm
13	0.42967 s	-82.353 mm
14	0.46267 s	-85.214 mm
15	0.49567 s	-89.096 mm
16	0.52867 s	-92.073 mm
17	0.56167 s	-94.954 mm
18	0.59467 s	-98.12 mm

3. Formulations-Thigh part & Calf part

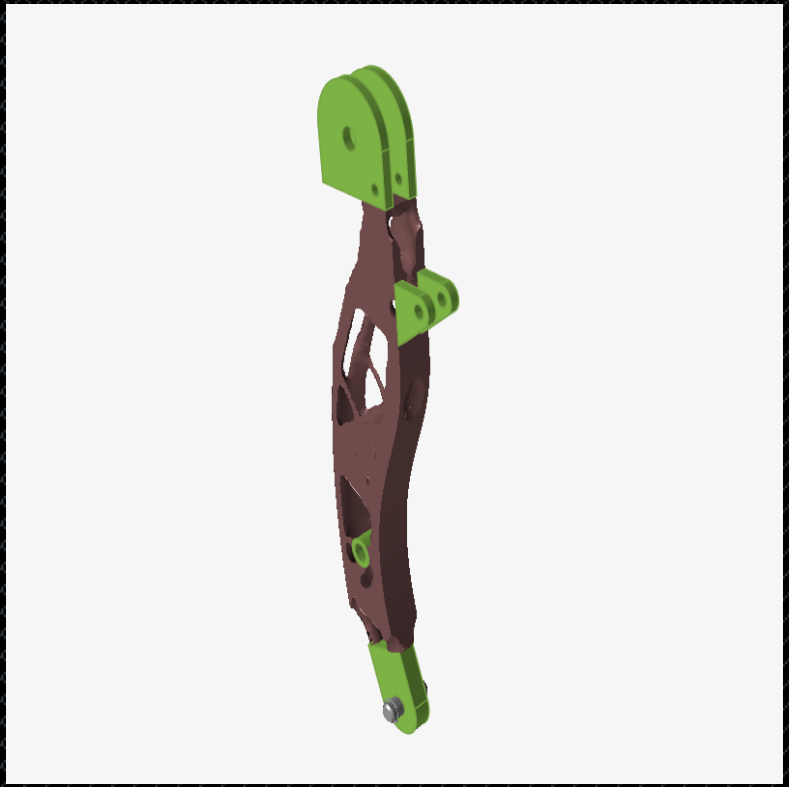
모션해석 결과



- 실제 스쿼트 동작의 특성이 잘 반영됨

3. Optimization-Thigh part & Calf part

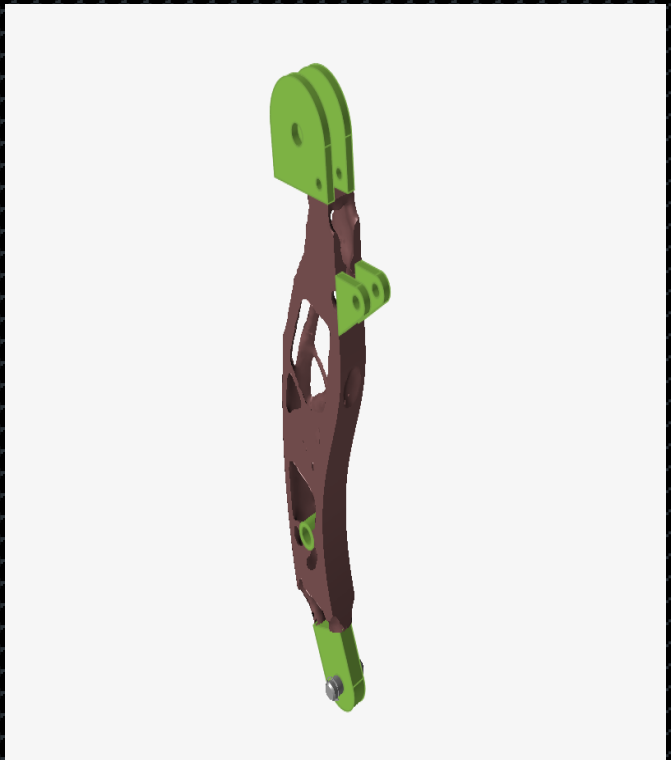
위상 최적화



- 디자인영역 질량 목표 20% 강성최대화
- POLYNURBS 적용 필요

3. Optimization-Thigh part & Calf part

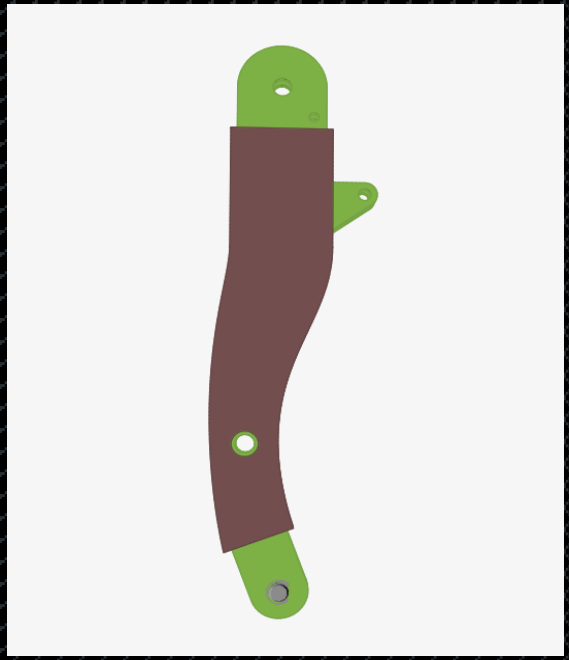
PolyNURBS



- 디자인 영역과 비 디자인 영역 간의 **지지부를 보강**, 자연스러운 연결이 되도록 함

3. Optimization-Thigh part & Calf part

위상 최적화



6.4 kg

2.8 kg

- 파트질량 56.1% 감소

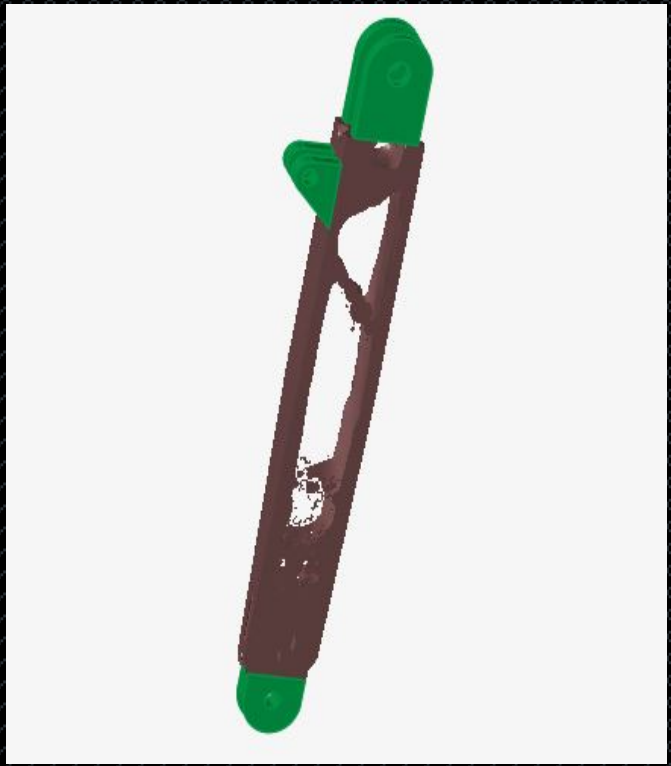
3. Optimization-Thigh part & Calf part

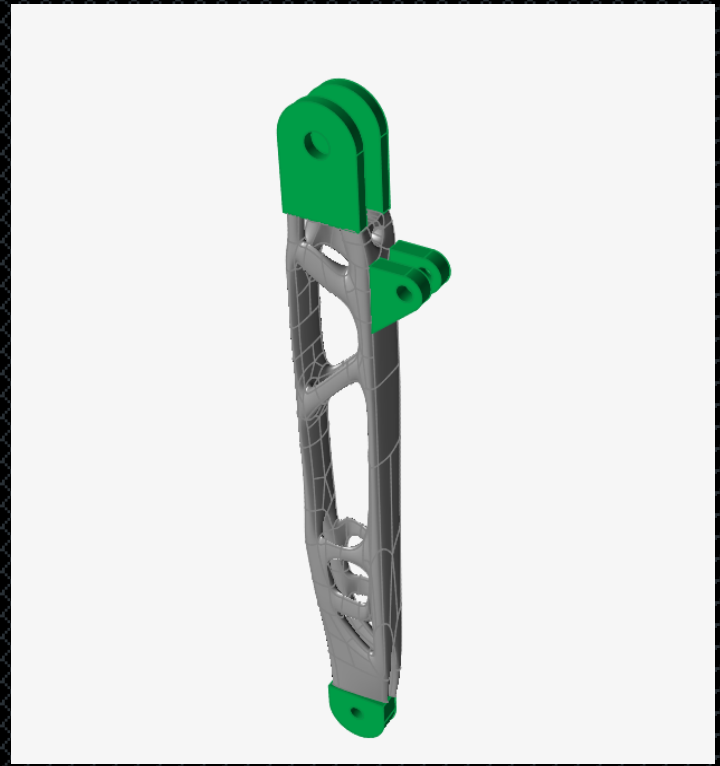
위상 최적화

- 디자인영역 질량 목표 20% 강성 최대화
- PolyNURBS 필요

3. Optimization-Thigh part & Calf part

PolyNURBS

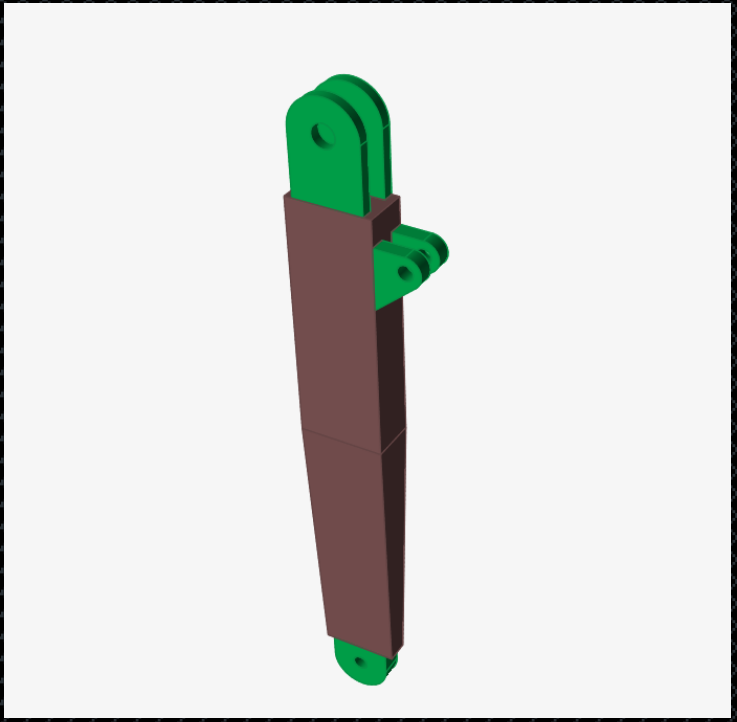




- 모호한 형상을 래핑과 브릿지를 통해 연결하여 자연스럽고 뚜렷한 형상이 되도록 함

3. Optimization-Thigh part & Calf part

PolyNURBS



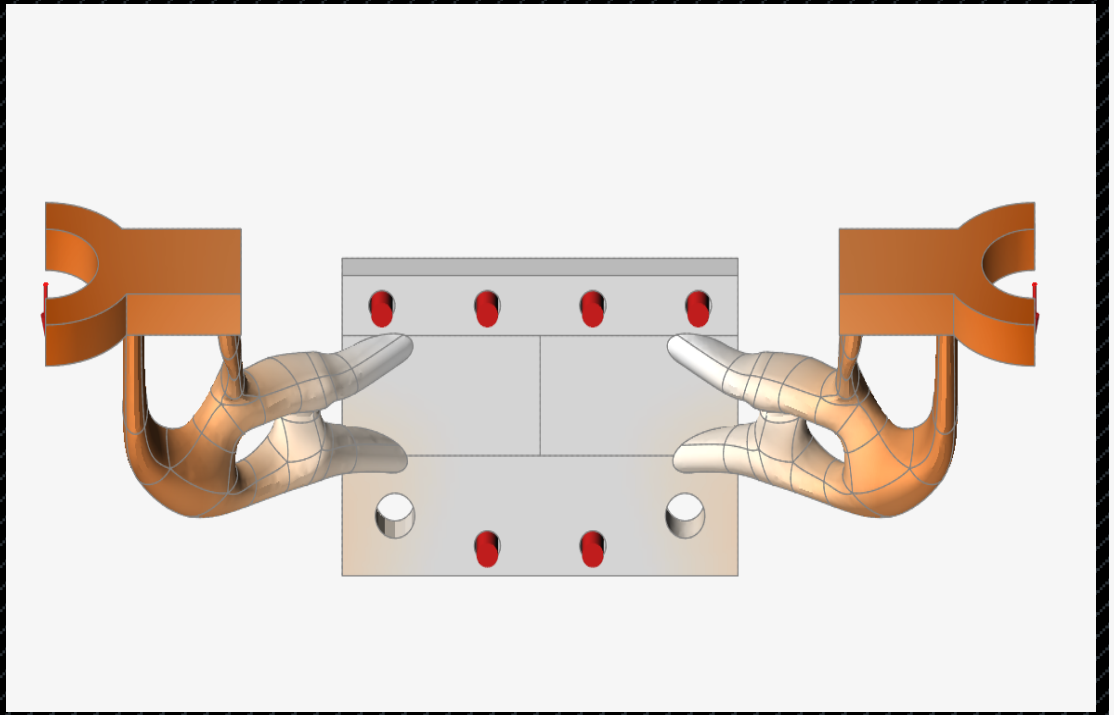
4.3 kg

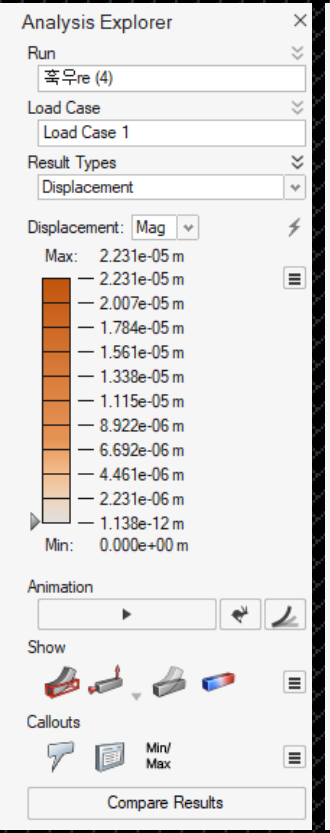
1.9 kg

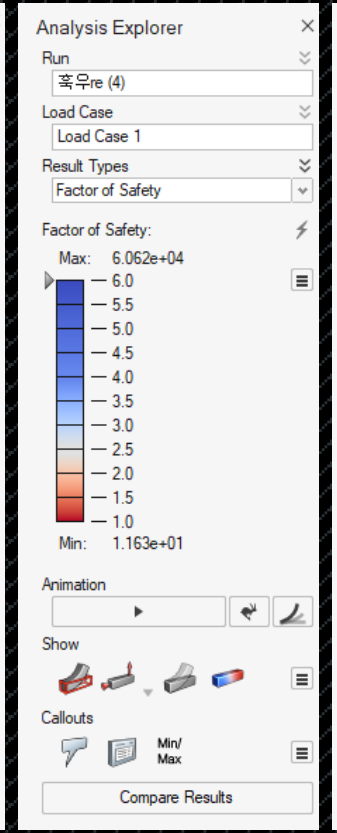
- 파트 질량 56% 감소

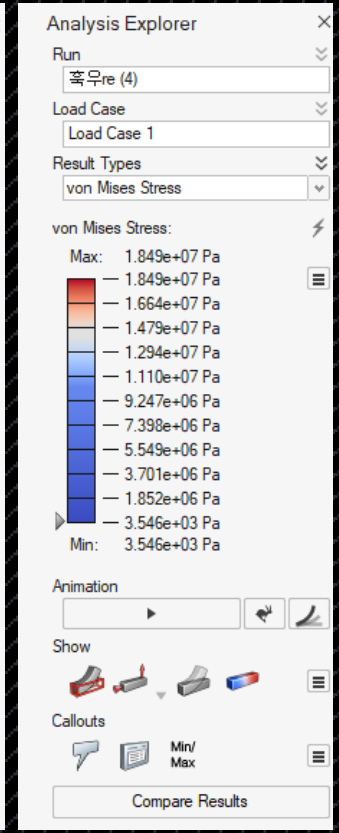
4 . Analysis

4. Analysis-Cell support



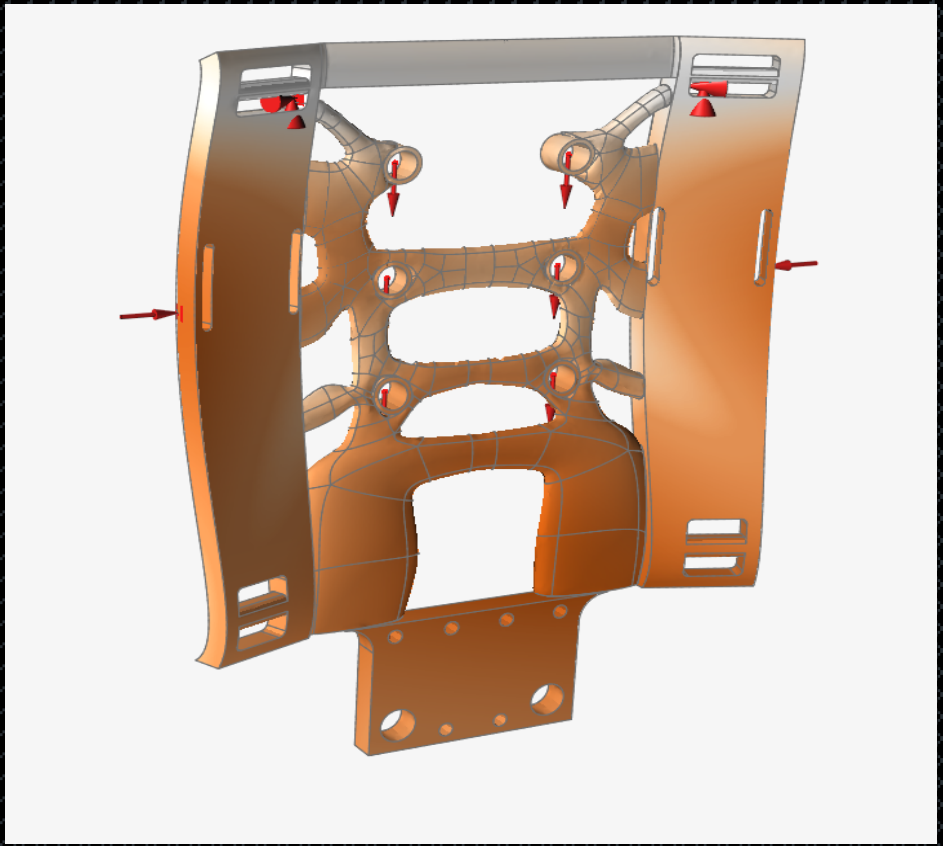


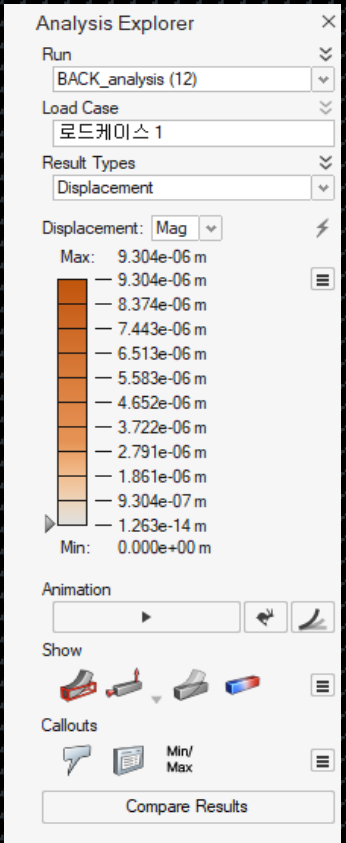


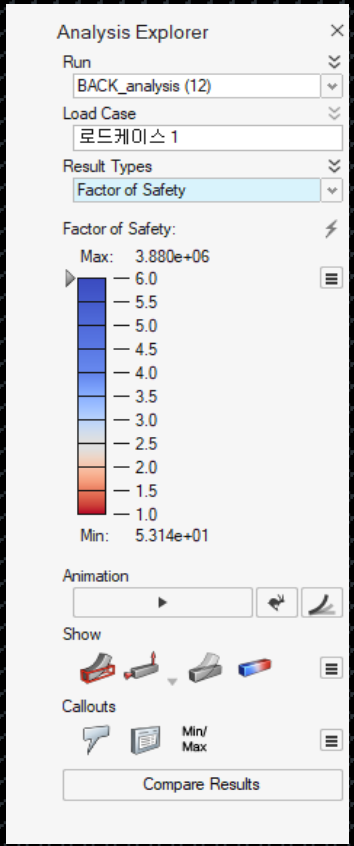


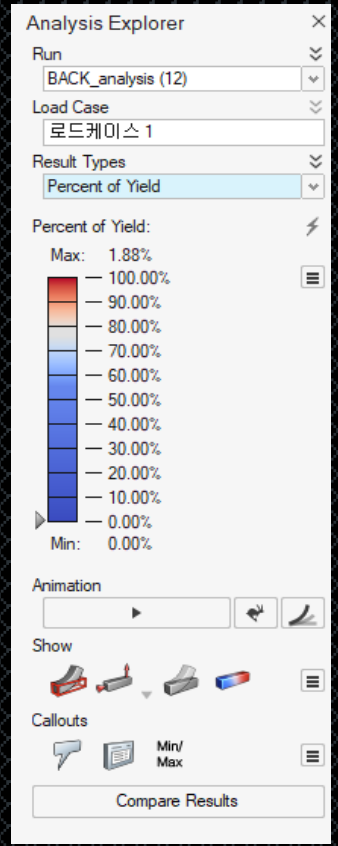
- 해석 결과 cell support의 변위가 0.02mm미만 인 것 과 safety factor가 10이상인 것으로 보아 안전한 형상임을 확인 할 수 있음

4. Analysis-Back Part



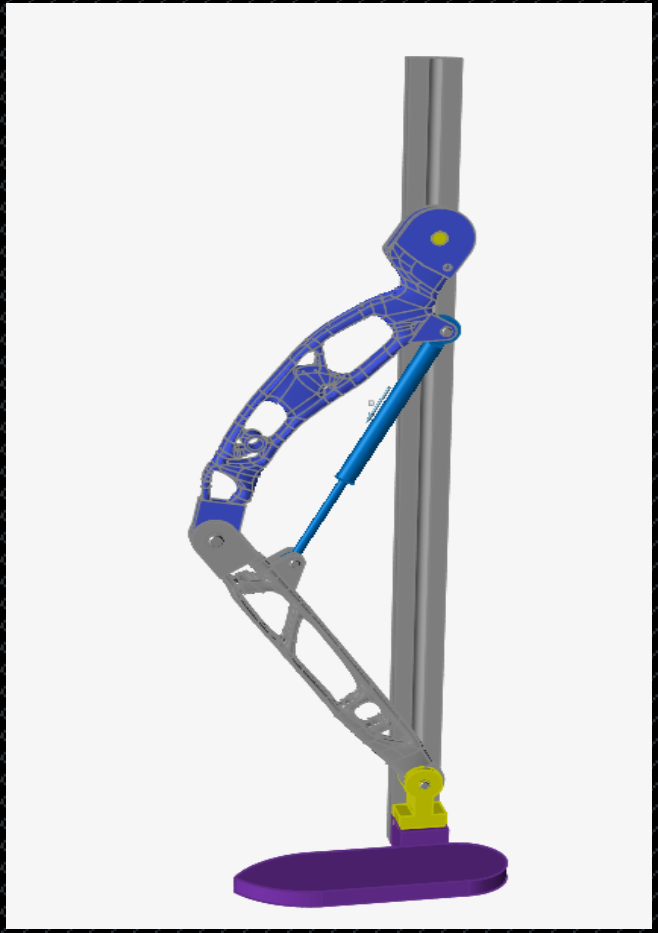


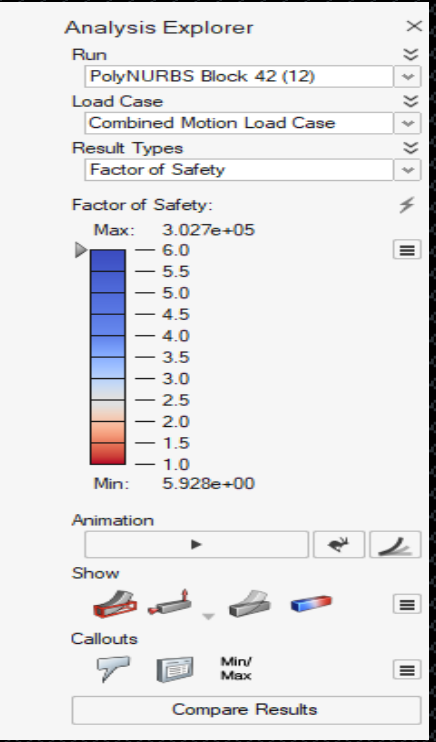


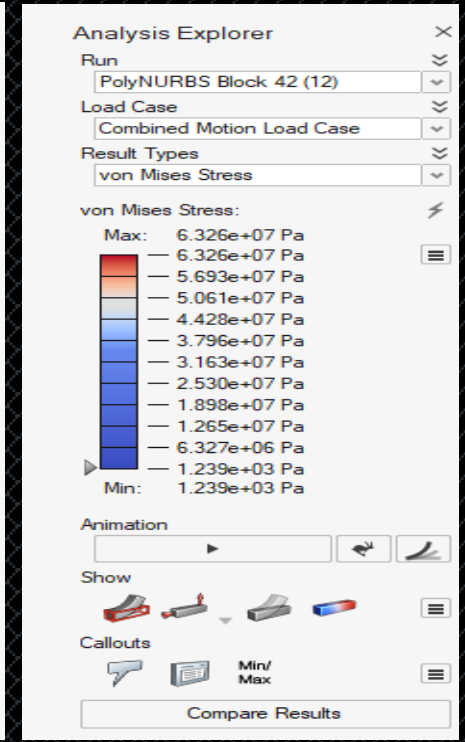


- 등판의 최대 변형이 0.009mm
- safety factor가 모든 부분에서 아주 높게 형성됨을 확인함
- percent of yield가 최대 1.88%이므로 안전한 것으로 판단

4. Analysis-Thigh part



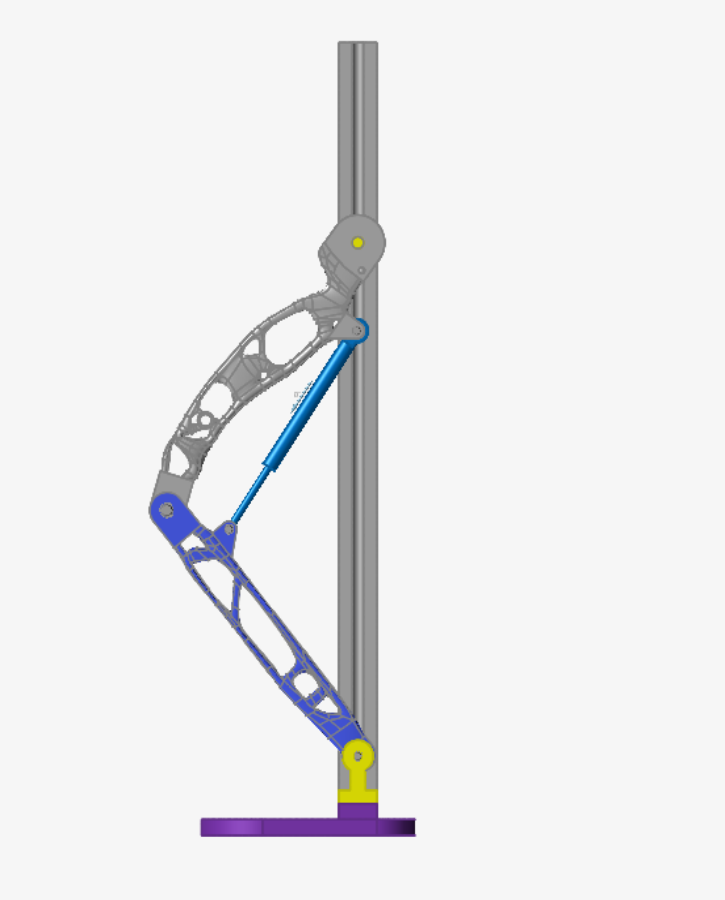


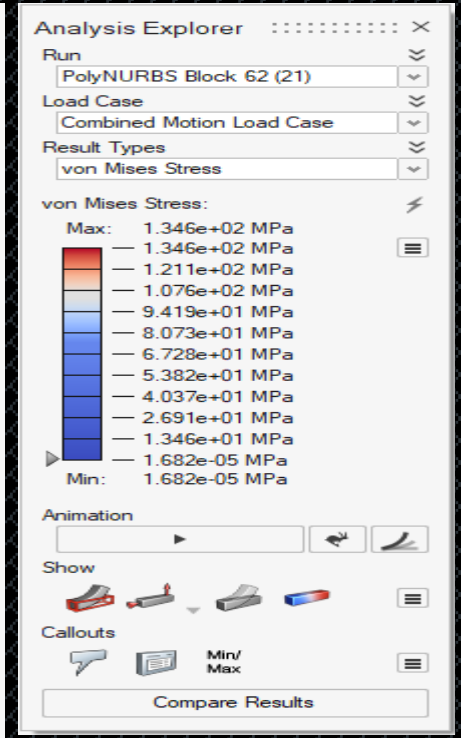


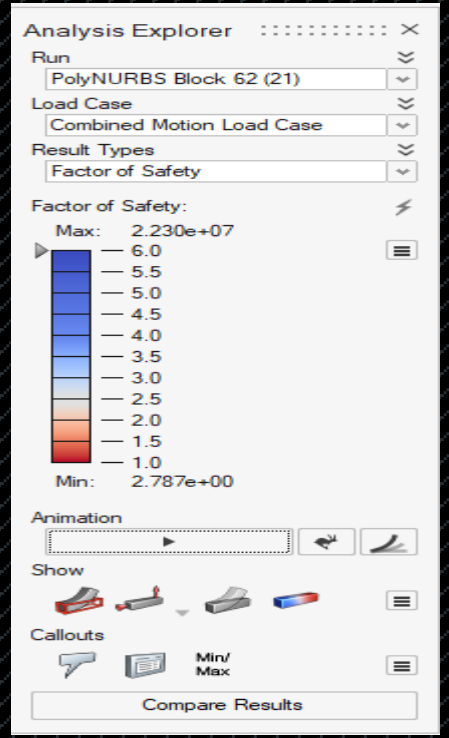
Von-Mises stress	63.3Mpa
Factor of Safety	5.93

-스쿼트 동작에 대한 모션 해석을 하였을 때 안전계수가 5 이상으로 충분히 안전한 것을 확인함

4. Analysis-Calf part



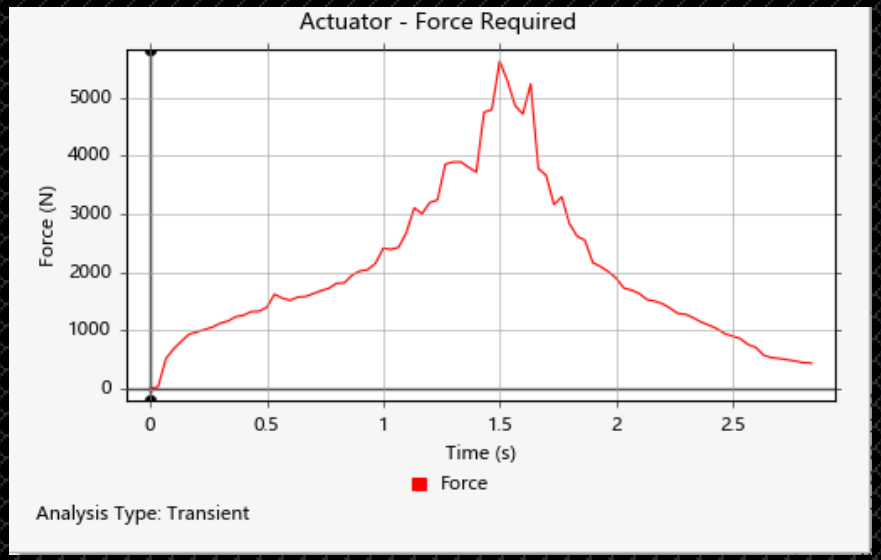


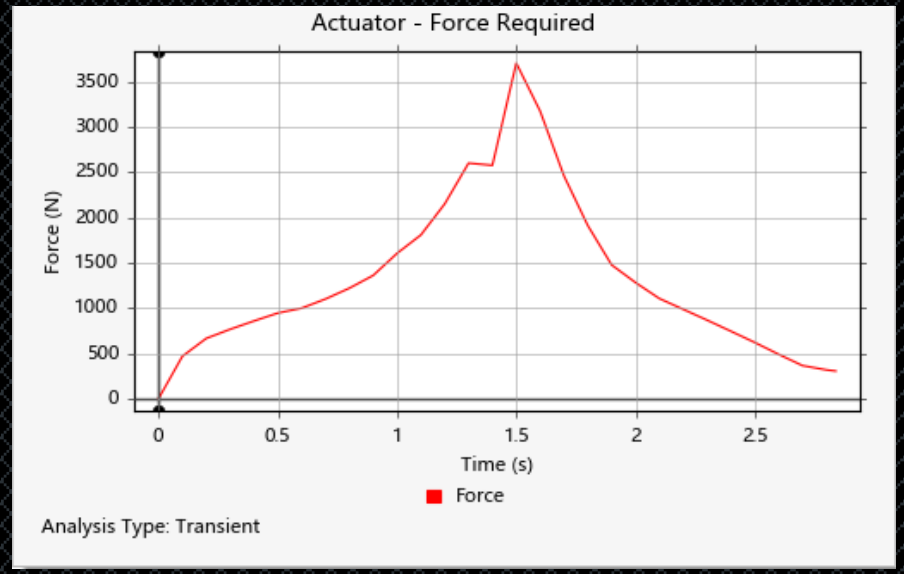


Von-Mises stress	204.7Mpa
Factor of Safety	2.79

-스쿼트 동작에 대한 모션 해석을 하였을 때 안전계수가 2.7 이상으로 충분히 안전한 것을 확인함

4. Analysis - Actuator





최적화 전

최고 5600N 평균 1960N

최적화 후

최고 3700N 평균 1256N

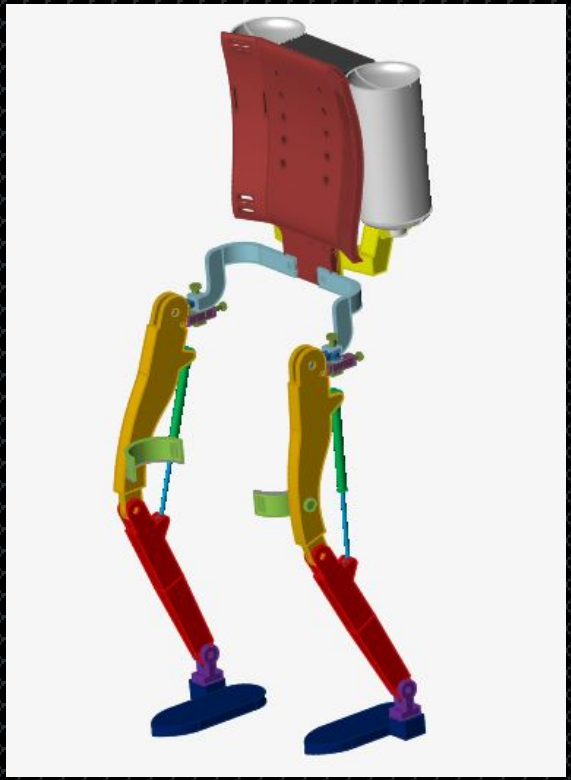
- 같은 스쿼트 모션을 최적화 전 후의 파트 무게를 고려하여 해석
- 최적화 후 Actuator의 평균 구동힘이 33.3%감소 함을 확인함.

5 . Final Design

5. Final design

질량	최적화 전(kg)	최적화 후(kg)	감소	안전계수
Back Part	8.419	4.845	43%	10이상
Cell Support	6.036	2.772	54%	10이상
Thigh Part	6.382	2.802	56%	5이상
Calf Part	4.349	1.913	56%	2.5이상

5. Final design



42.87kg

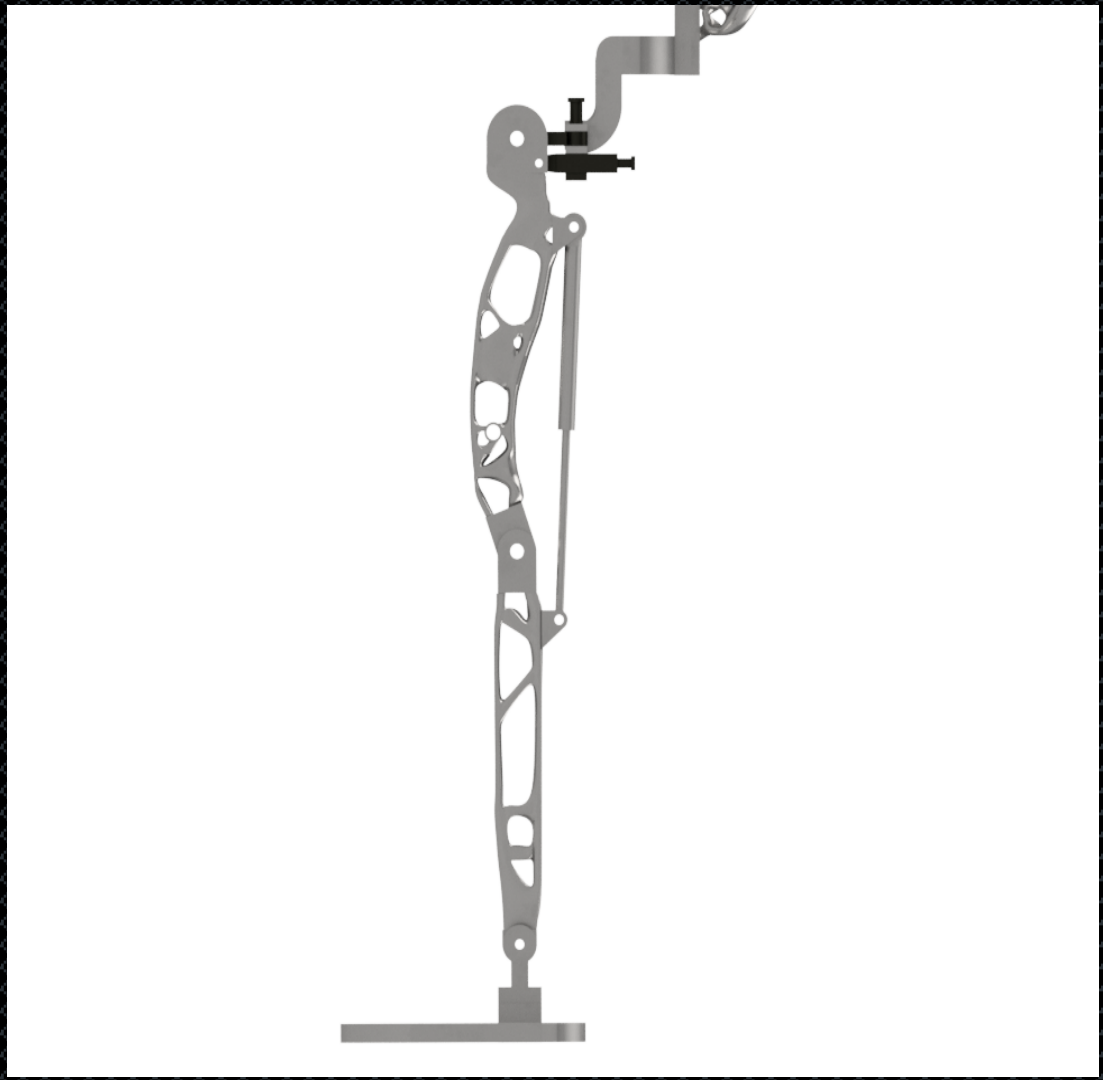
22.83kg

- 파워팩과 산소통의 무게를 제외한 로봇의 **질량이 46.7% 감소함**

(발판 : 실리콘 고무, 나머지부품 : 고탄소강)

5. Final design

5. Final design



5.Final design & Conclusion

Thank You

Reference

-홍만복, 김광태, 윤여훈 (2019)ACE-Knee, a Novel Modularized Knee Exoskeleton: Concept Design and Analysis of Design Requirements by Knee Motion Analysis

-Steven H. Collins (2008) Dynamic Walking Principles Applied to Human Gait

-Arthur Osipov (2019) Fire exoskeleton to facilitate the work of the fireman