

AOC 2020

Topology optimization of electric wheelchair

Seoul National University of Science and Technology
Mechanical Engineering
Myoungjong Ko
Automotive Engineering
Jaekyeong Park
Instructor: HyunKyu Kim

Contents

1. Introduction

- Electric wheel chair concept
- Required product specification
- Reference specification

2. Design Space Designation

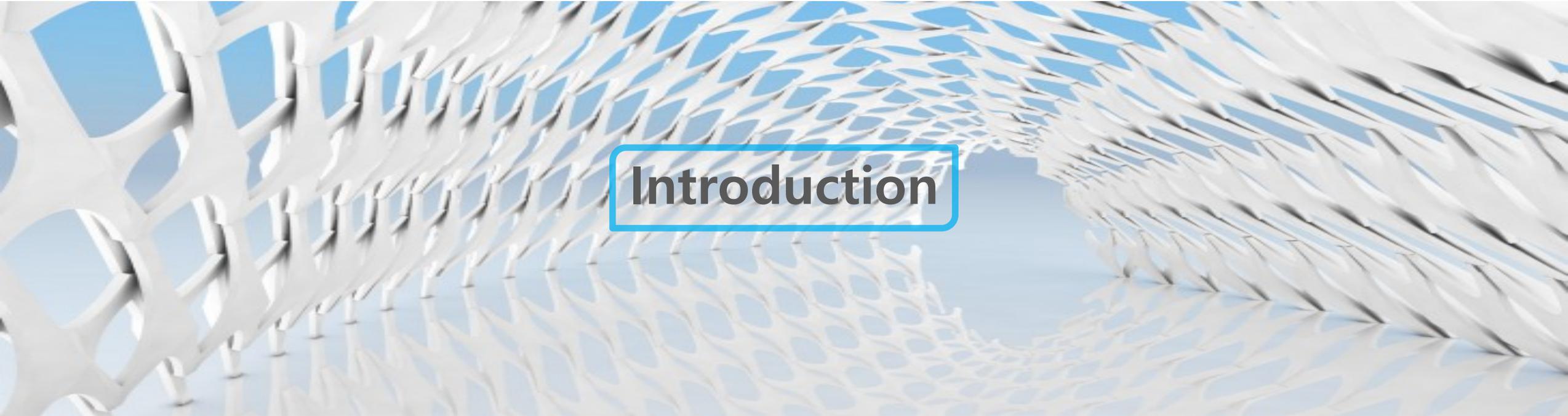
- Ergonomic approach
- Load cases
- Boundary condition
- Contact
- Response constraints
- 1st Design Space

3. Design Optimization and Analysis

- Frame optimization and analysis
- Shaft optimization and analysis
- Chair frame optimization and analysis
- Middle Pipe Design
- Final Validations

4. Manufacturing Analysis

- Frame cast
- Frame improvements
- Shaft cast
- Shaft improvements
- Final result and comparison
- Reference

A 3D architectural rendering of a white, lattice-like structure, possibly a facade or a decorative element, set against a blue background. The structure is composed of interconnected, curved, and faceted white elements that create a complex, porous, and organic-looking pattern. The perspective is from a low angle, looking down a path that recedes into the distance, creating a sense of depth and scale. The lighting is soft, highlighting the three-dimensional quality of the structure.

Introduction



- **인체공학 기반 설계**를 통해 척추의 부담과 근육의 피로를 줄이는 디자인
- 위상 최적화를 통해 구조적으로 **안전하며 경량화**를 통해 모터 및 배터리의 단가를 낮춰 접근성을 높일 수 있는 또는 더 오랜 시간 주행할 수 있도록 설계된 휠 제어

전동 휠체어 가격대



B400 KV [오토복 전동휠체어]

①광고 **2,300,000원**

생활/건강 > 실버용품 > 휠체어 > 전동휠체어

실버, 장애용품전문 기업. 사랑으로

등록일 2019.02. · ❤️ 찜하기 0 · 📄 신고하기



해외 힘 리튬 건전지를 가진 고품질 금 PROTA

1,782,400원

생활/건강 > 실버용품 > 휠체어 > 전동휠체어

회원 가입 시 2,000원 할인 쿠폰 자동 발급

등록일 2020.07. · ❤️ 찜하기 0 · 📄 신고하기



해외 무료 배송 2019 새로운 모델 경량 전동 휠

2,646,300원

생활/건강 > 실버용품 > 휠체어 > 전동휠체어

회원 가입 시 2,000원 할인 쿠폰 자동 발급

등록일 2020.07. · ❤️ 찜하기 0 · 📄 신고하기

전동 스쿠터 가격대



AU테크 에코로 M8 전기 전동스쿠터

①광고 **449,000원**

스포츠/레저 > 오토바이/스쿠터 > 스쿠터 > 전동스쿠터

주행거리 : 35km | 최고속도 : 25km | 제품무게 : 19.8kg | 바
당일발송! 바로픽업 서비스로 제품조립, 출고까지 다이렉트!

리뷰 537 · 등록일 2020.03. · ❤️ 찜하기 22 · 📄 신고하기



AU테크 에코로 S50 36V 8Ah 10인치 전동스쿠터

최저 399,000원 판매처 10

스포츠/레저 > 오토바이/스쿠터 > 스쿠터 > 전동스쿠터

주행거리 : 35km | 최고속도 : 25km | 제품무게 : 22.5kg | 배터리 : 리튬 이온

리뷰 ★★★★★ 285 · 등록일 2018.09. · ❤️ 찜하기 322 · 📄 정보 수정요청



해외 지쿠터 미니 할리 전기 전동 스쿠터 DC3 배터리별도

419,000원

스포츠/레저 > 오토바이/스쿠터 > 스쿠터 > 전동스쿠터

주행거리 : 30km | 최고속도 : 30km | 제품무게 : 30kg | 배터리 : 리튬 이온

리뷰 45 · 구매건수 76 · 등록일 2020.03. · ❤️ 찜하기 383 · 📄 신고하기



해외 10 인치 24V250W 전동 휠체어 모터 휠 휠체어 컨트롤러

894,600원

생활/건강 > 공구 > 소형기계 > 모터

[매월 1, 11, 21일 위메프데이/매일매일 특가 릴레이/다양한 할인혜

등록일 2020.06. · 찜하기 0 · 신고하기

정격 출력: 200~300W



해외 [다인몰]무료 배송 my6812 150 w 24 v 전동 스쿠터 모터

110,730원

스포츠/레저 > 자전거 > 자전거부품 > 기타자전거부품

회원 가입 시 2,000원 할인 쿠폰 자동 발급

등록일 2019.10. · 찜하기 0 · 신고하기

정격출력: 150W

전력 소비량에 따라 배터리의 용량 차

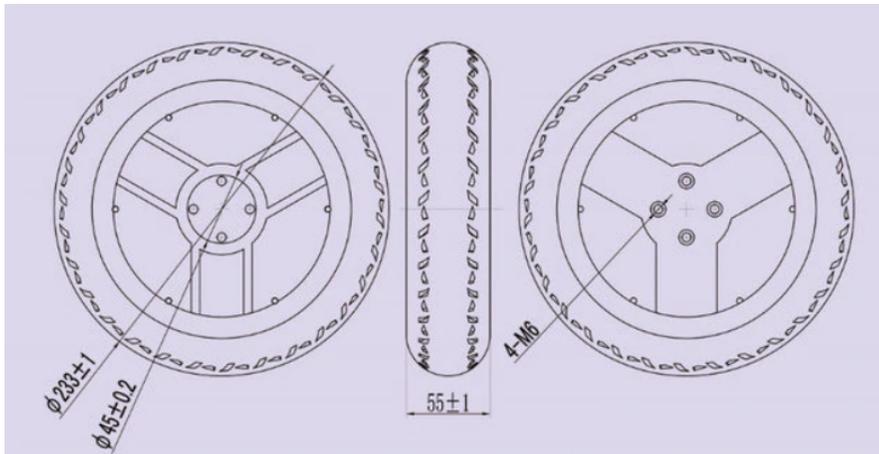
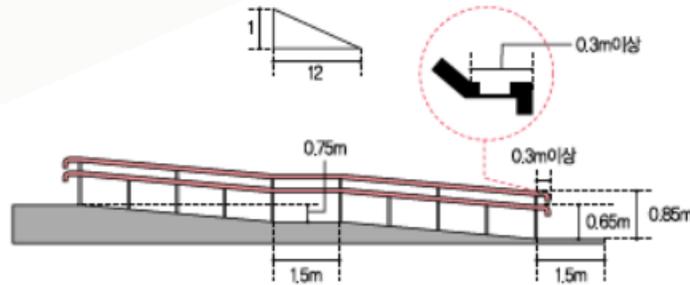




모델: 오토복 B400KV
100kg



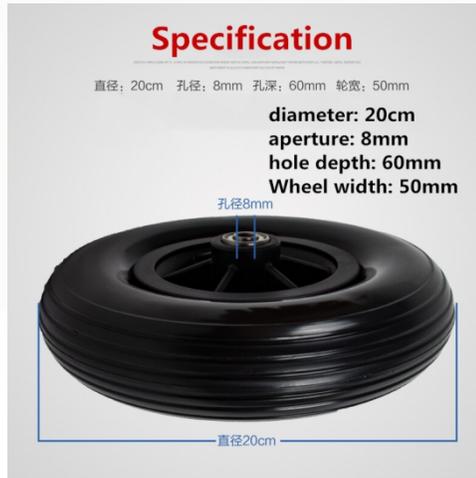
모델: Au Tech M8
19.8kg



- 최소 100kg의 성인이 탔을 때 지탱 가능하여야 한다.
- 경사각 10도, -10도의 도로에서 성인을 지탱할 수 있어야 하며 전도현상이 발생하지 않아야 한다. (장애인 편의시설 증진에 관한 법률 중 경사로는 4.7도 이하)
- 휠은 기존 휠체어의 바퀴를 사용해야 한다.
- 배터리를 장착할 충분한 공간을 가져야 한다.
- 형상이 복잡하지 않은 이상 고압 주조법 사용을 되도록 피하도록 한다.
- 알루미늄 또는 플라스틱을 사용하여 제작해야 한다.

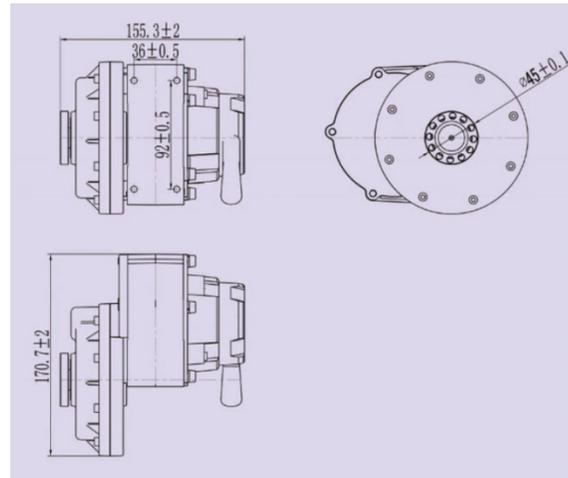


- 제조사: 오토북 코리아 헬스케어
- 제품명: B400KV
- 차체 무게: 100kg
- 최고속도: 9km/h



Wheel

Polyurethane, Rubber



Motor

Aluminum case
24V, 200W



Battery

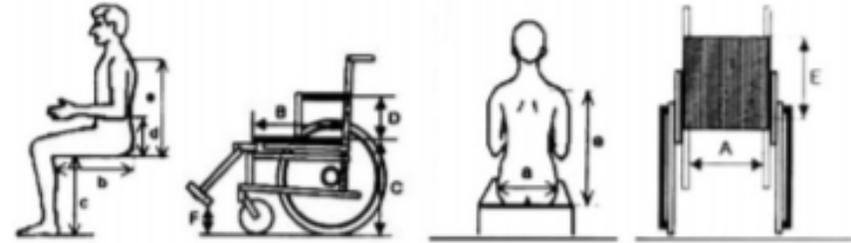
Aluminum case
59 * 14.8 * 6 [mm]



Design Space Designation

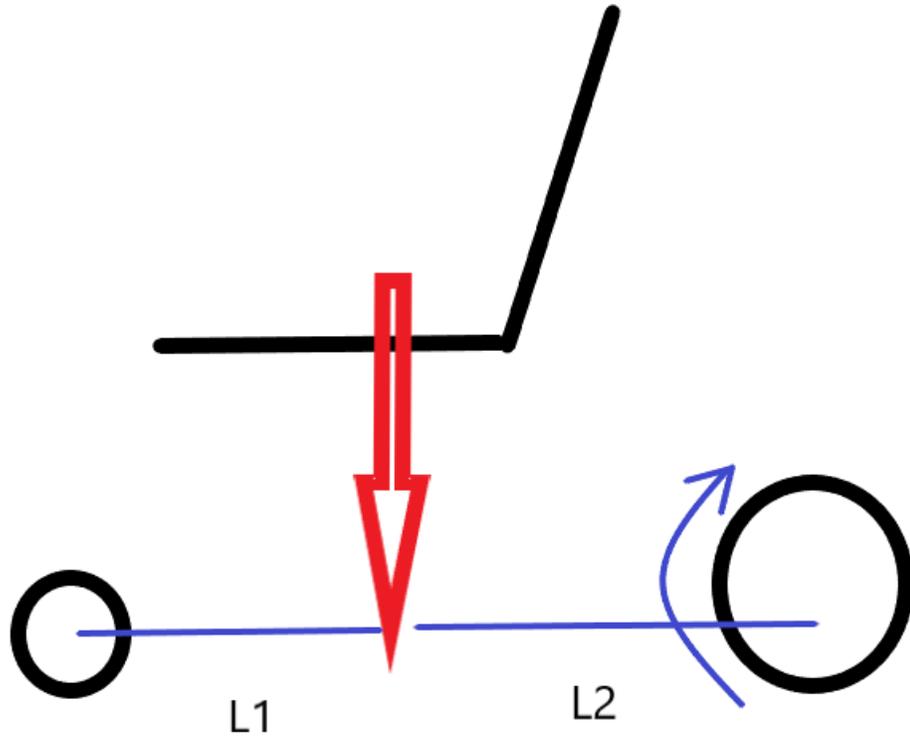
성별	측정항목	치수		
		5분위	50분위	95분위
남성	앉은엉덩이너비 (a)	303	337.5	366.5
	앉은엉덩이 오금수평길이 (b)	409	453.5	498.5
	앉은오금높이 (c)	344.5	382.5	409.5
	앉은팔꿈치높이 (d)	199.5	249	285.5
	앉은어깨높이 (e)	529.5	579	620.5
여성	앉은엉덩이너비 (a)	300.5	334.5	367
	앉은엉덩이 오금수평길이 (b)	398.5	443	481.5
	앉은오금높이 (c)	323.5	350.5	385
	앉은팔꿈치높이 (d)	179	219	261
	앉은어깨높이 (e)	480.5	523.5	563

한국 65세 이상 남녀의 휠체어 관련 인체치수 [mm]

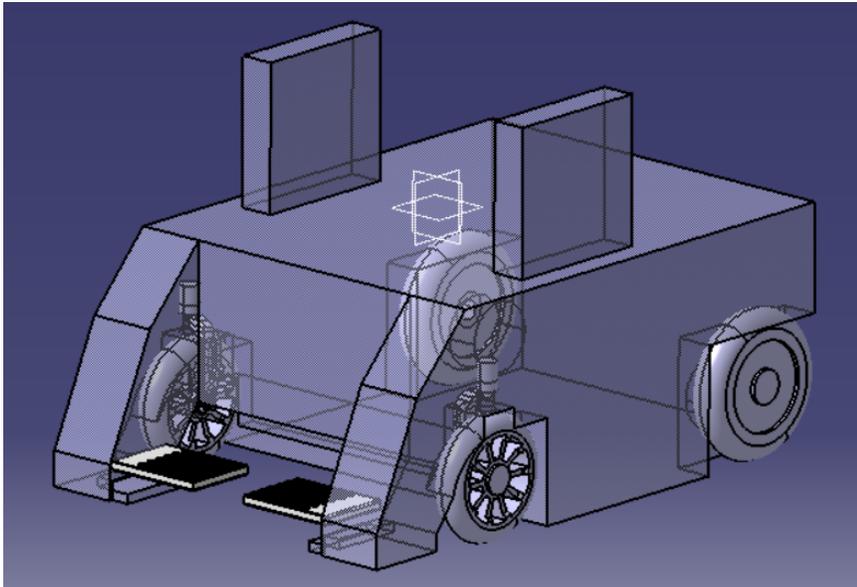


설계요소	인체측정항목	설계기준
좌석너비 (A)	앉은엉덩이너비 (a)	$a + 30\text{mm}$
좌석깊이 (B)	앉은엉덩이 오금수평길이 (b)	$b - 20\sim 50\text{mm}$
좌석높이 (C)	앉은오금높이 (c)	바닥 위 50mm 이상에 발 판이 위치해야 하며, 오금 길이에 따라 높이가 결정
발판높이 (F)		
팔걸이높이 (D)	앉은팔꿈치높이 (d)	팔꿈치 높이 - 25mm
등받이높이 (E)	앉은어깨높이 (e)	일반적으로 거드랑이 밀으 로 100mm 사이에 위치하 게 할 수 있다.

인체치수를 고려하여 휠체어를 모델링한다.



경사로를 오를 때 전복 현상이 일어나지 않도록 의자의 위치를 충분히 앞에 위치하게 하여 모델링 한다.
L1=260mm, L2=325mm



좌석 너비	400mm
좌석 깊이	460mm
좌석 높이	330mm
발판 높이	60mm
팔걸이 높이	230mm
등받이 높이	480mm
의자와 허벅지 각도	15degree



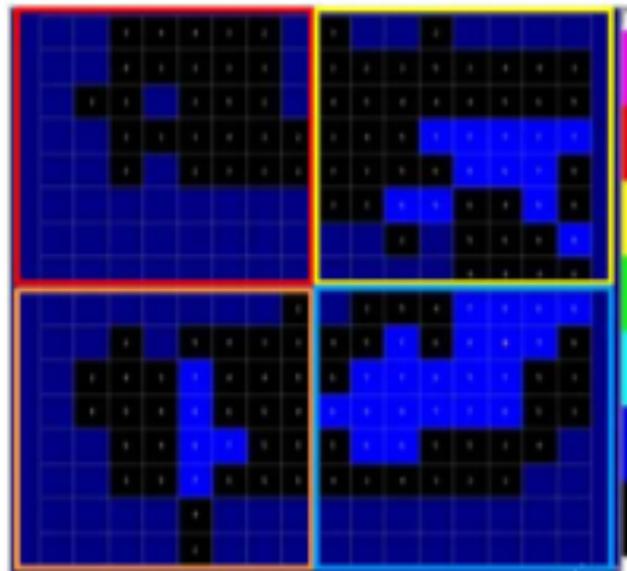
정자세



왼쪽 기댄 자세



숙인 자세



Postures	Sum(N) (%BW)	Weight of Front-Rear half area (Weight ratio)	Weight of Left-Right half area (Weight ratio)
Erect	414N (58%)	130N-283N (1:2.2)	201N-213N (1:1)
Middle	642N (90%)	355N-289N (1.2:1)	312N-330N (1:1.1)
Front	589N (83%)	554N-36N (15:1)	299N-290N (1:1)
Slouched	398N (56%)	236N-163N (1.4:1)	202N-196N (1:1)
Sided (Righty)	450N (63%)	211N-240N (1:1.1)	348N-177N (1:1.9)

착석 자세에 따른 다양한 하중 조건들이 생긴다.



정자세 발 받침 80kg 성인 남성 기준: 4.5kg
(반복 측정 기준)
-> 100kg 성인 남성 기준: 5.6kg(55.18N)

		의자 왼쪽	의자 오른쪽	등 받침	발 받침	팔 받침(왼쪽)	팔 받침(오른쪽)
정자세	의자 앞	88.9N	88.9N	215.8N	55.1825N	70.5N	70.5N
Sum: 58%	의자 뒤	195.6N	195.6N				
숙인자세	의자 앞	214N	214N	0N	55.1825N	70.5N	70.5N
Sum: 80%	의자 뒤	178.4N	178.4N				
왼쪽	의자 앞	192.8N	101.5N	215.8N	55.1825N	92.4N	48.6N
Sum: 63%	의자 뒤	212.1N	111.6N				

등받이 하중: 숙인 자세 총 의자하중 - 정자세 총 의자 하중

팔 받침 하중: 100% - 총 의자하중 - 등받이 하중 - 발 받침 하중

자료에 기반하여 하중계산

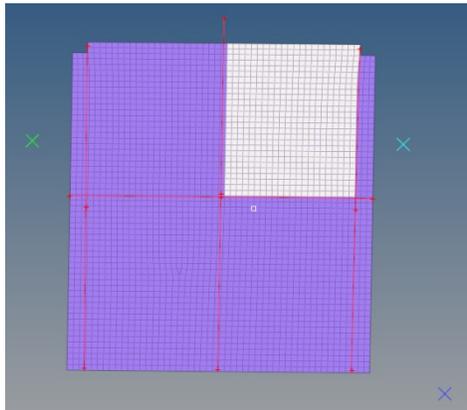
자료출처: 착석자세 모니터링 시스템 개발을 위한 착석 자세 추정 연구, 대한기계학회



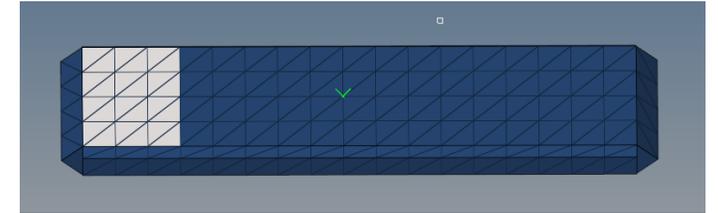
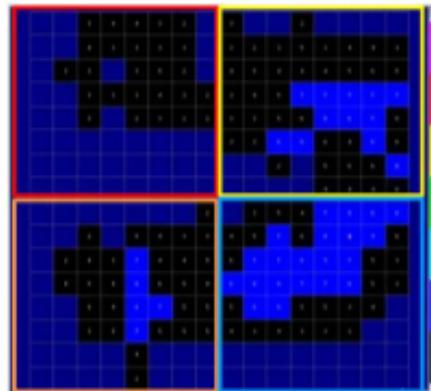
정자세: 180mm * 300mm



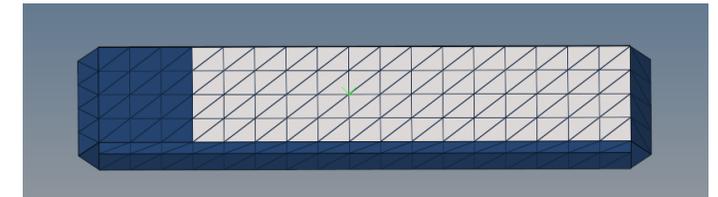
오른쪽 기댄 자세: 90mm * 300mm



180mm * 240mm



팔 뒤통치 접촉면: 24*55

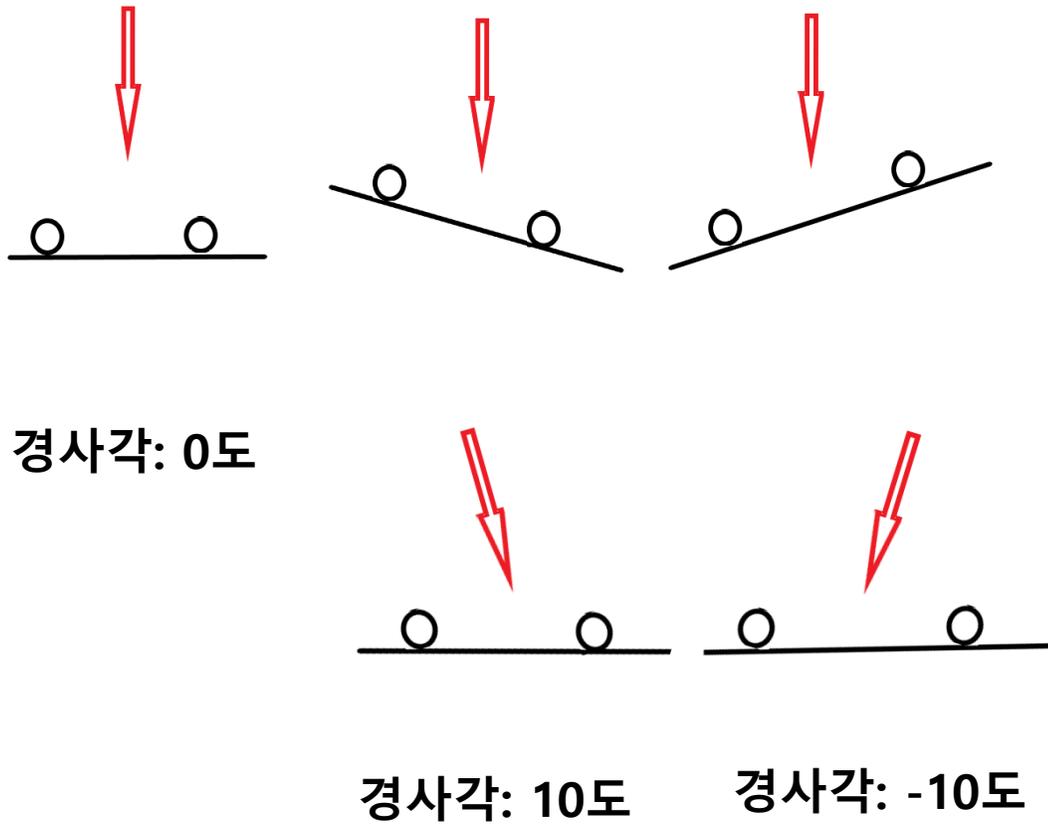


팔 접촉면: 216*55

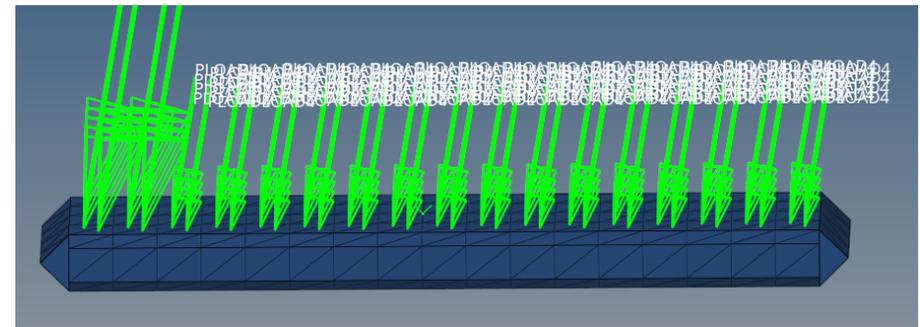
각 접촉면의 면적을 측정하여 압력을 계산한다.

		의자 왼쪽	의자 오른쪽	등 받침	발 받침(왼쪽)	발 받침(오른쪽)	팔 받침(왼쪽)	팔 받침(오른쪽)
정자세	의자 앞	2.05E-03	2.05E-03	4.00E-03	1.53E-03	1.53E-03	1.36E-02	1.36E-02
Sum: 58%	의자 뒤	4.34E-03	4.34E-03				4.41E-03	4.41E-03
숙인자세	의자 앞	4.95E-03	4.95E-03	0N	1.53E-03	1.53E-03	1.36E-02	1.36E-02
Sum: 80%	의자 뒤	3.96E-03	3.96E-03				4.41E-03	4.41E-03
왼쪽	의자 앞	4.46E-03	2.35E-03	8.00E-03	1.53E-03	1.53E-03	1.75E-02	9.20E-03
Sum: 63%	의자 뒤	4.71E-03	2.48E-03				5.83E-03	3.06E-03

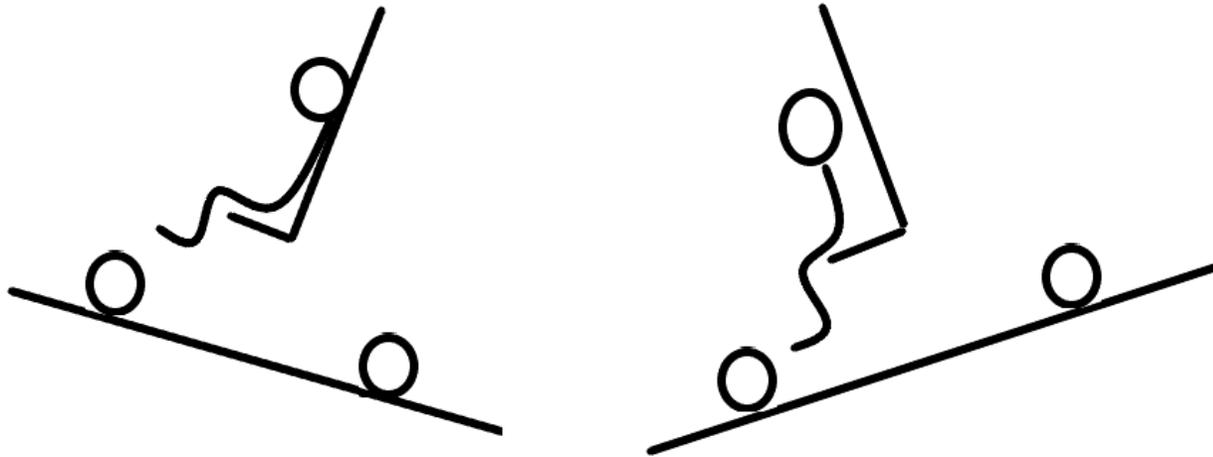
각 접촉면의 면적을 측정하여 압력을 계산한다.[Mpa]
 착석자세에 따라 4가지 Load cases가 생긴다.



경사로의 경사각에 따라 3가지 로드 케이스가 생긴다.



경사각 로드케이스의 10도의 경사각을 가진 pressure로 하중을 준다.



경사각 0, 정자세

경사각 0, 숙인 자세

경사각 0, 왼쪽으로 기댄 자세

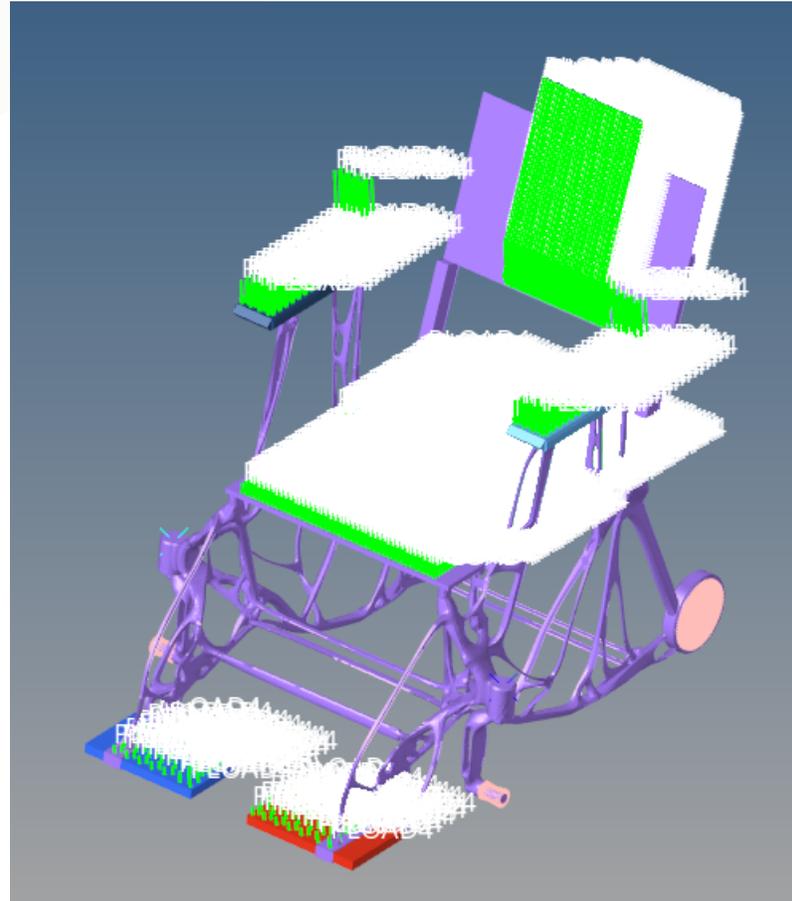
경사각 0, 오른쪽으로 기댄 자세

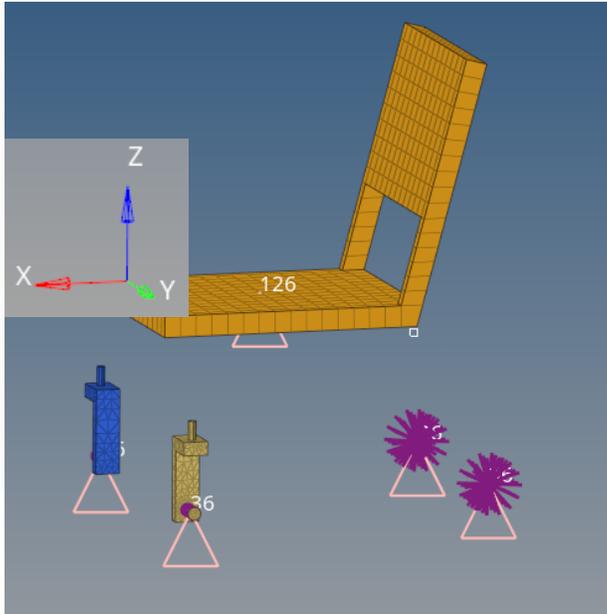
경사각 10, 정자세

경사각 -10, 숙인 자세

경사각 10에서는 정자세
경사각 -10에서는 숙인 자세를 취하게 되므로

총 6가지의 Load cases가 생긴다.

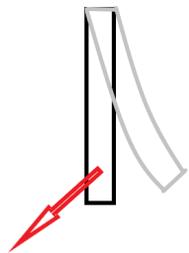
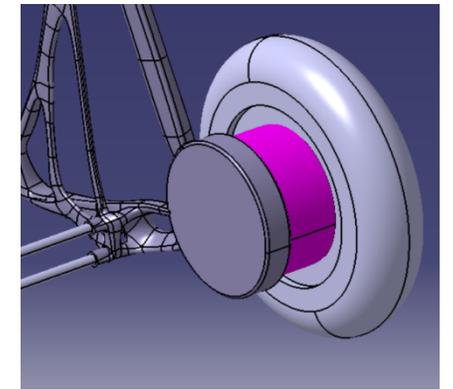
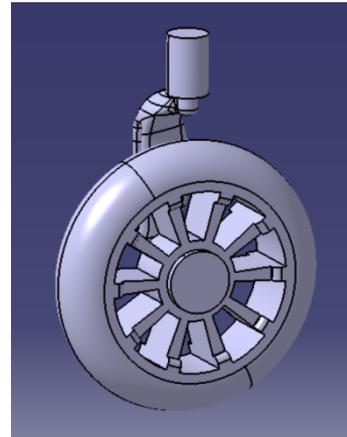




Shaft(앞 바퀴 연결 부)
z, dz 자유도 구속

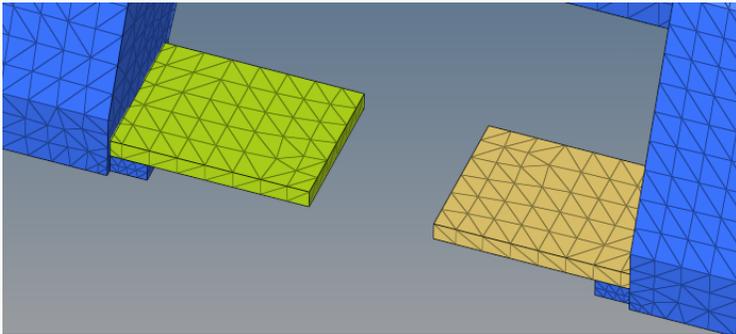
의자의 중심
x, y, dz 자유도 구속

프레임 뒤(모터 연결 부)
z, dz 자유도 구속

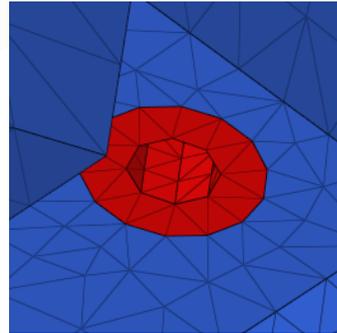


예시: dx회전 변형

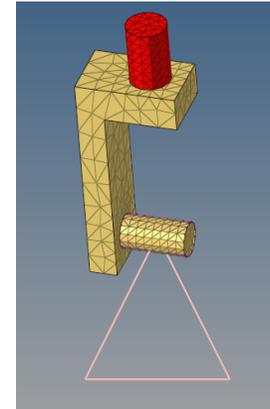
- 앞 바퀴의 Shaft, 모터의 지지 부가 dx, dy방향으로 회전변형이 발생할 수 있으므로 dz만을 구속 회전 변형이 일어나며 x, y 방향으로의 병진 변형이 발생할 수 있으므로 z만을 구속한다.
- 의자는 x, y방향으로의 변위를 구속해준다.
- 앞 바퀴, 모터는 강체로 가정하여 RBE2(상대변위 x)를 생성하여 구속해준다.



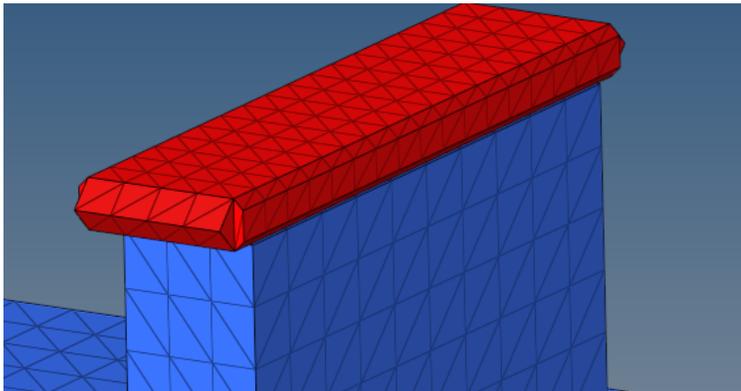
발 받침 - 프레임: contact
발 받침: non rigid



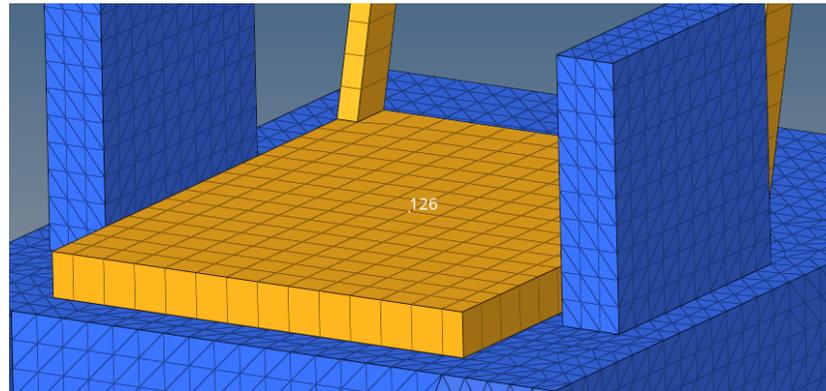
회전 축 회전 제어기 - 프레임: contact
제어기: rigid



제어기 - 회전축: contact
회전축: non rigid



팔 받침 - 프레임: contact
팔 받침: rigid



의자- 프레임: contact
의자: rigid

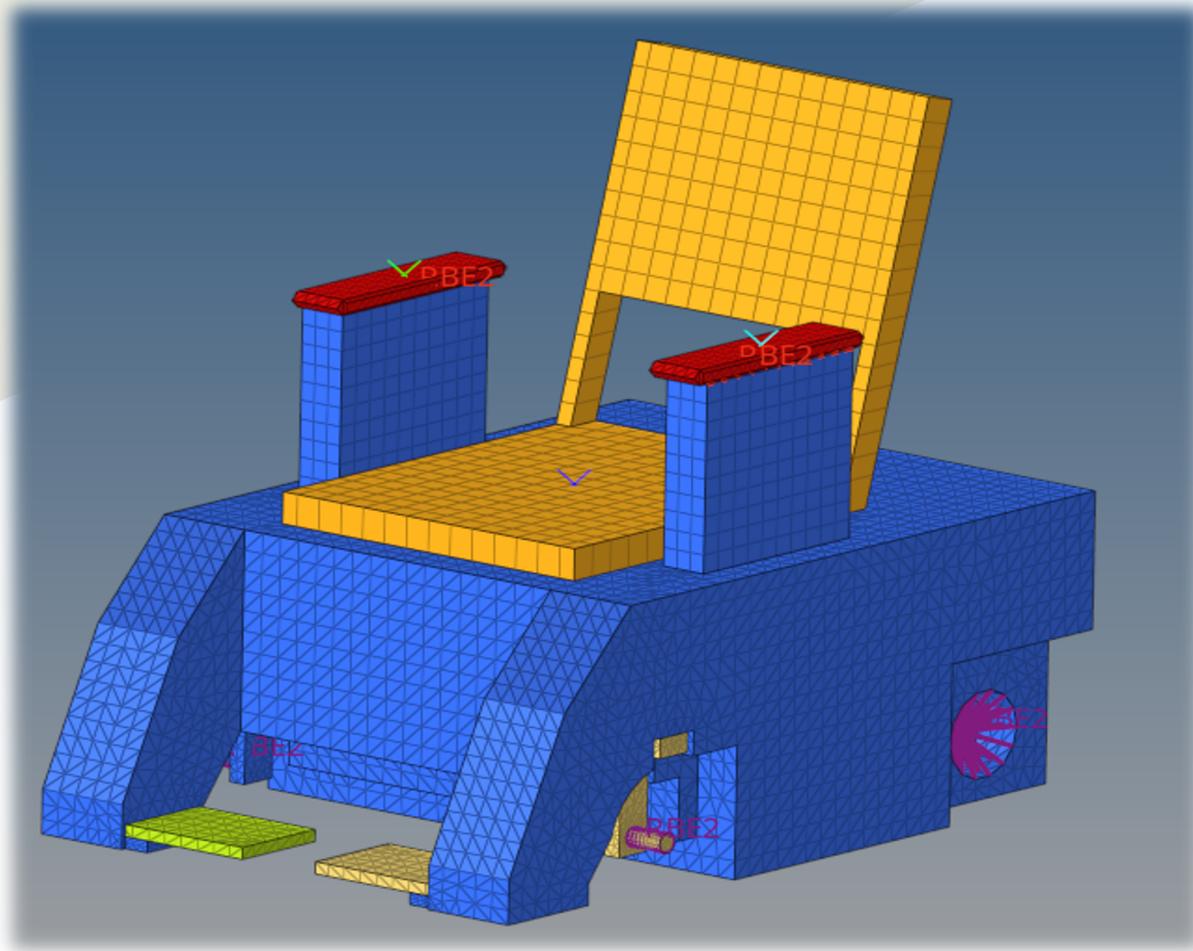
Young's Modulus	1300[Mpa]
Poison's Ratio	0.42
Density	904[kg/m ³]
Yield Strength(굽힘)	40[Mpa]
Yield Strength(압축)	10[Mpa]

플라스틱(Polypropylene)

Young's Modulus	69e+9[N/m ²]
Poison's Ratio	0.3
Density	2700[kg/m ³]
Yield Strength	250[Mpa]

알루미늄

안전계수는 3이상으로 설계.
알루미늄: 83.3Mpa
플라스틱(굽힘): 13.3Mpa



Frame(1st Design Space): 알루미늄
Shaft(2nd Design Space): 알루미늄
Chair frame(3rd Design Space): 알루미늄

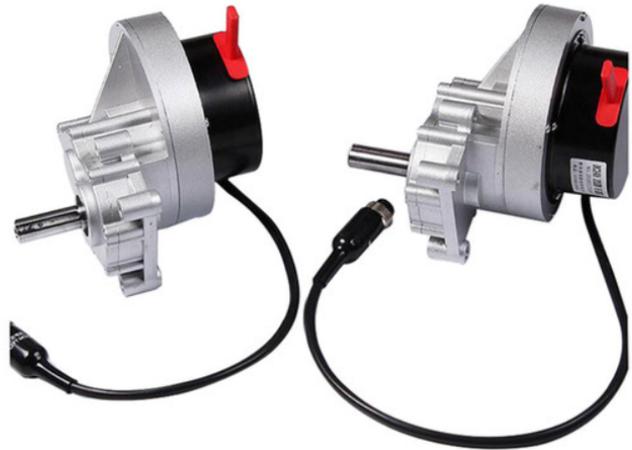
Arm rest: rigid body
Foot rest: rigid body
Back rest: 플라스틱
Motor: RBE2
Front wheel: RBE2

Features and Specifications:

- Operating Voltage (VDC): 24
- Output Power (W): 200
- No-load Current (A): ≤ 3.6
- No-load Output Speed (RPM): 135
- Motor OD (mm): 79
- Output Shaft OD (mm): 17 (with 6mm keyway and key)
- Weight (lbs): 31 for a set (15.5 lbs per motor)

일반 휠체어 속도: 1.6 ~ 2.5m/s
기어 비 가정: 최대 5

고유진동수: 15.7 Hz



일반 휠체어 모터

$$\text{Speed}_{\text{Vehicle}} = \frac{\text{RPM}_{\text{Engine}} \times \text{Tire Radius} \times 2\pi}{\text{Trans Ratio}_{\text{Chosen Gear}} \times \text{Axle Ratio}}$$

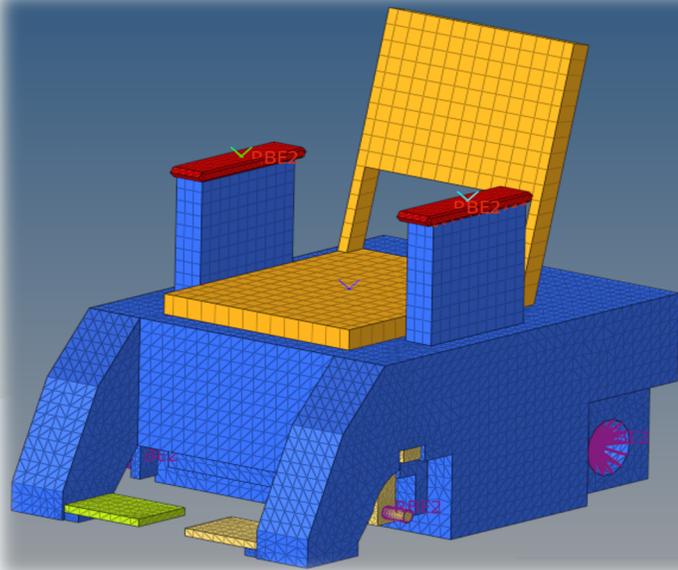
자료출처:

http://unit808.com/shop/goods_view.php?id=2528467187&ad_code=naver_shopping&NaPm=ct%3Dkdxkxgo%7Cci%3D13099fcc36163cff429caa0704d547b733c0c683%7Ctr%3Dslsl%7Csn%3D637611%7Chk%3D006d04f0f7d0c93785d58c5ef92dce595066f4e6

<http://craig.backfire.ca/pages/autos/horsepower>

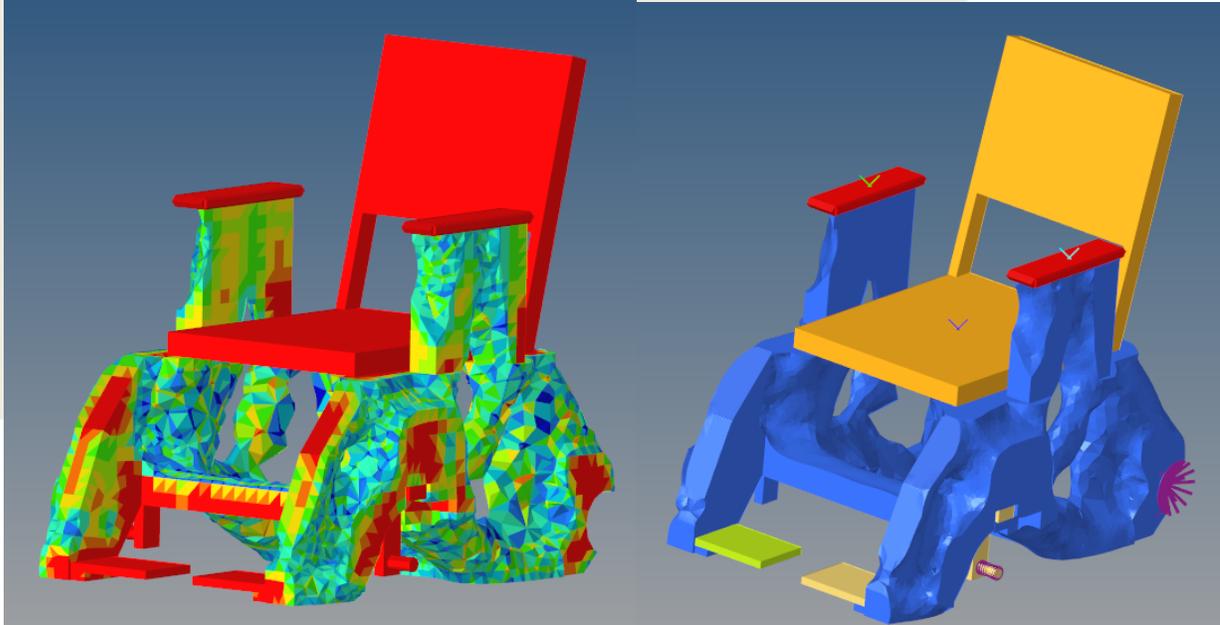
A 3D rendering of a white, porous lattice structure, possibly representing a topology-optimized design. The structure consists of interconnected beams forming a complex, repeating pattern of irregular shapes. The background is a light blue gradient.

Design Optimization and Analysis



진행해감에 따라 Element size를 알맞게 줄이고
DTPL card에서
 $MINDIM = \text{Element size} * 3$
 $MAXDIM = MINDIM * 2$ 로 설정한다.

Design Variable	휠체어 프레임의 형상 밀도
Objective	Weighted compliance 최소화 (모든 경우에 대해 강성 최대)
Constraints	1. Von mises stress $\leq 83\text{Mpa}$ 2. Target Mass $\leq 20\% \sim 30\%$



Element Size: 25
 Minimum Jacobian: 0.99
Mass Target: 25%
 Iso value: 0.4

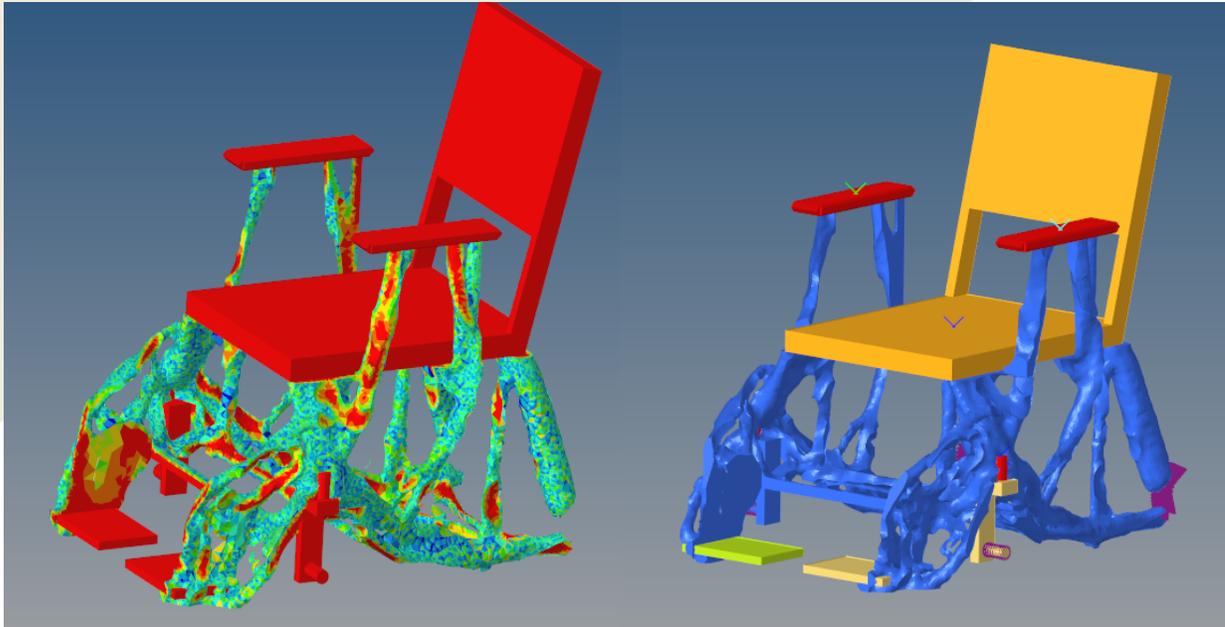
129.6 kg 질량감소: 73%

	Max Von mises[Mpa]	Safety Factor
0Degree 정자세	1.32	189.3939
0Degree 숙인 자세	1.63	153.3742
0Degree 왼쪽	1.585	157.7287
0Degree 오른쪽	1.697	147.3188
10Degree 정자세	2.063	121.1827
-10Degree 숙인자세	2.577	97.01203

```
-----
2 WCOMP Complan      --  --  --  1.913E+01 MIN
1 VOLFR VolFrac      --  3 SOLI  2.500E-01 < 2.500E-01  0.0 A
4 FREQ N_freque      7   1  --  1.265E+02 > 2.100E+00  0.0
-----
```

OPTIMIZATION HAS CONVERGED.

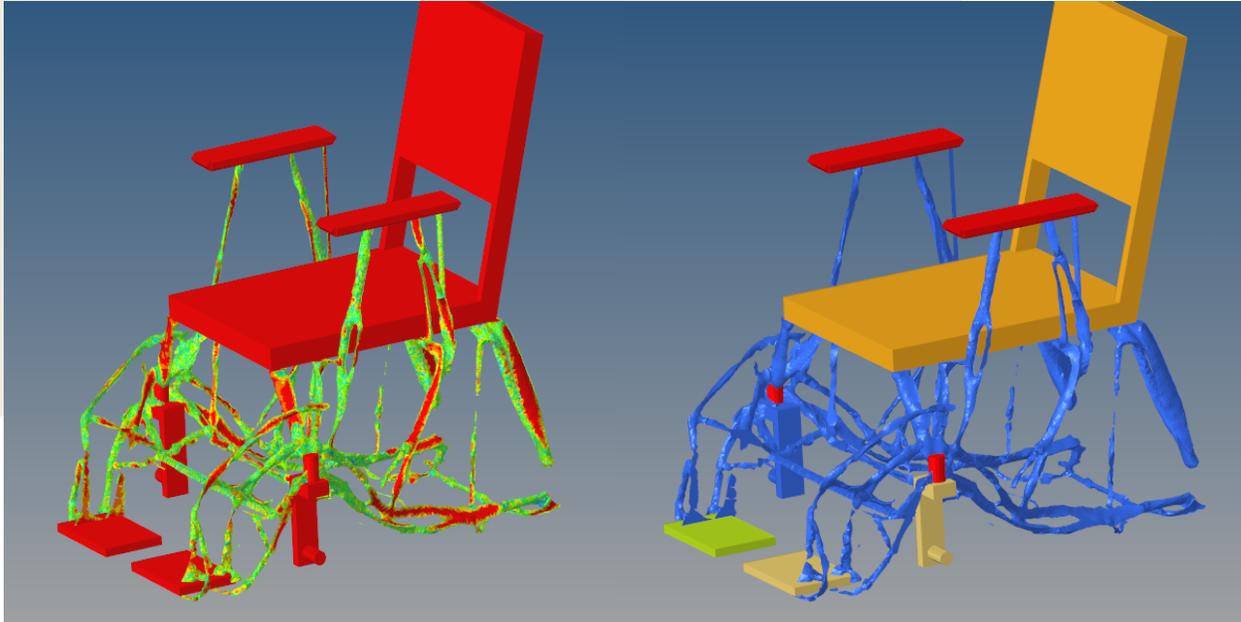
FEASIBLE DESIGN (ALL CONSTRAINTS SATISFIED).



Element Size: 10
Minimum Jacobian: 0.83
Mass Target: 27%
Iso value: 0.37

23.34 kg 질량감소: 82%

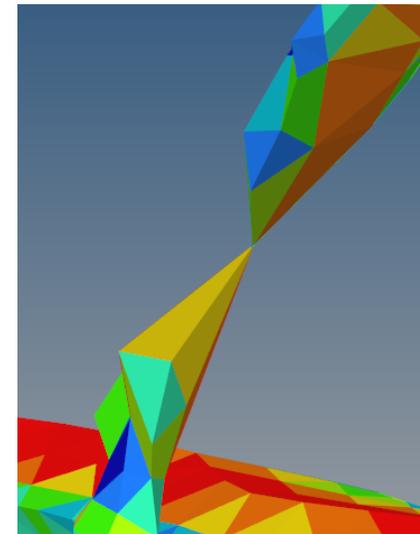
	Max Von mises[Mpa]	Safety Factor
0Degree 정자세	3.097	80.72328
0Degree 숙인자세	5.373	46.52894
0Degree 왼쪽	3.99	62.65664
0Degree 오른쪽	4.639	53.89092
10Degree 정자세	3.756	66.56017
m10Degree 숙인 자세	3.11	80.38585



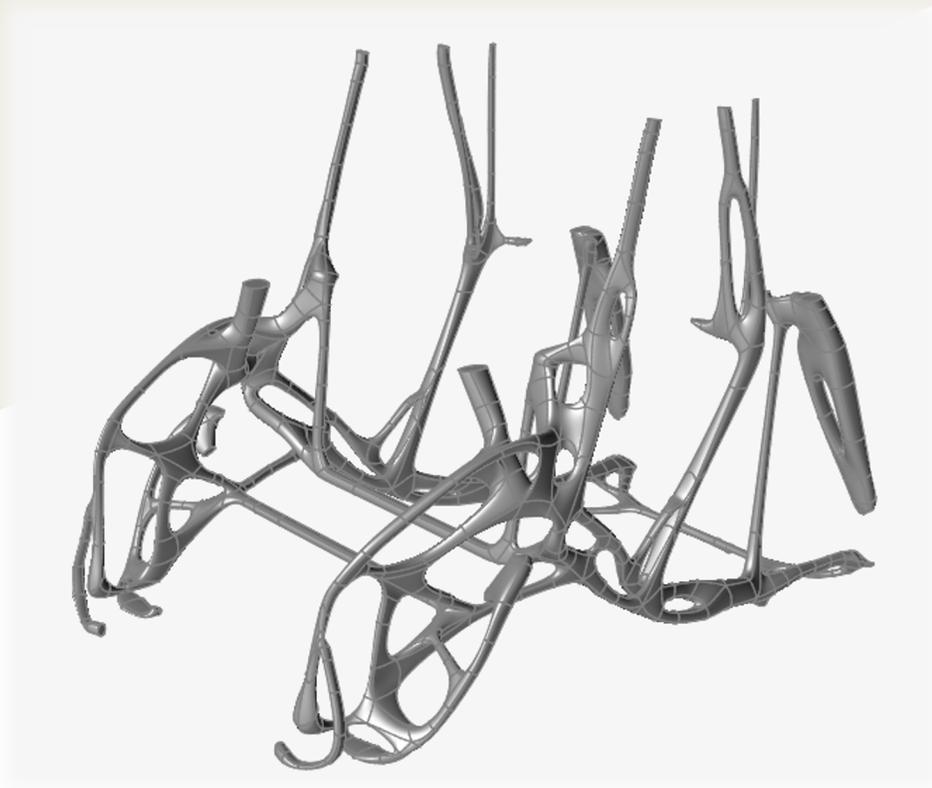
Element Size: 7
Minimum Jacobian: 0.83
Mass Target: 25%
Iso value: 0.5

7.2 kg

질량감소: 69%



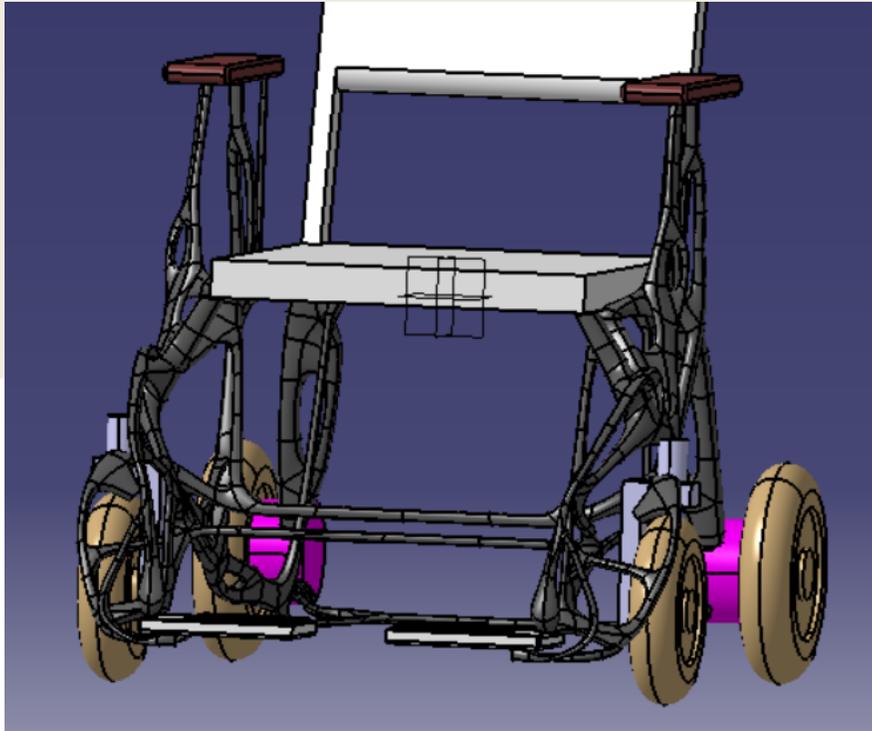
각 프레임의 끊어진 부분을 Osmooth의 connection detect를 이용하여 연결할 경우 다음과 같이 연결되는 부분들에서 응력집중이 발생
= 해석결과 부정확 -> polynurbs 처리 후 재해석



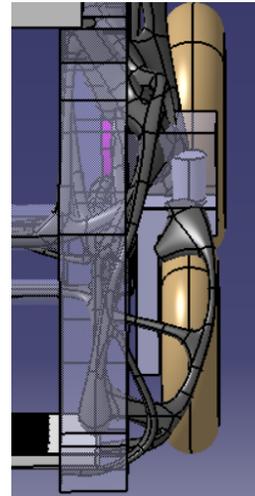
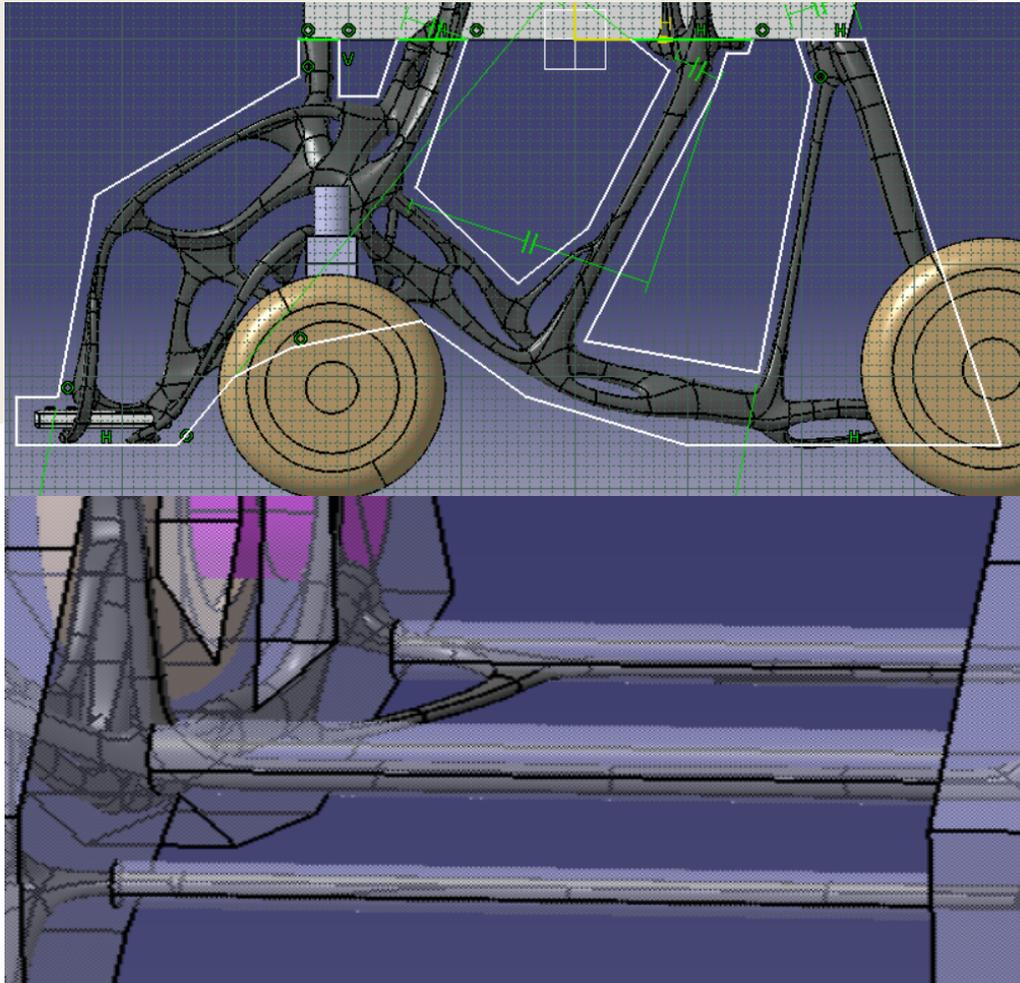
8.1 kg

질량감소: 65%

	Max Von mises[Mpa]	Safety Factor
0Degree 정자세	6.9	36.23188
0Degree 숙인자세	9.65	25.90674
0Degree 왼쪽	9.084	27.52092
0Degree 오른쪽	15	16.66667
10Degree 정자세	12	20.83333
m10Degree 숙인 자세	9.65	25.90674

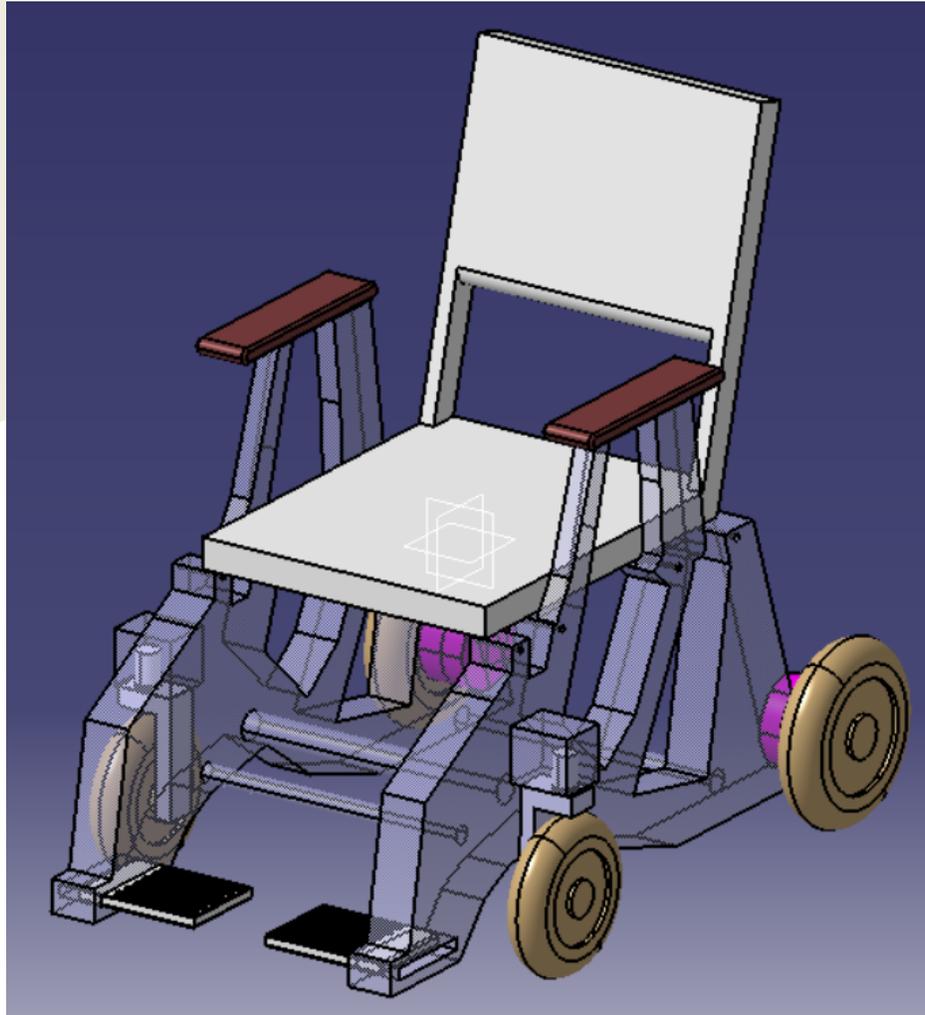


1. 매우 복잡한 형상을 가지고있어 high pressure casting을 통한 제작을 하게 될 것이다.
2. 모든 목적함수, 제한조건을 만족하는 모델이지만 폭, 너비 등 부피가 크고 지나치게 복잡한 형상으로 인해 High pressure casting을 진행하며 Overflow, Chiller의 부착이 힘든 부분들이 생길 것이며, Last Air 및 Volume shrinkage 해결이 힘들어 질 것이다.
3. 외관 상 좋지 않은 모습

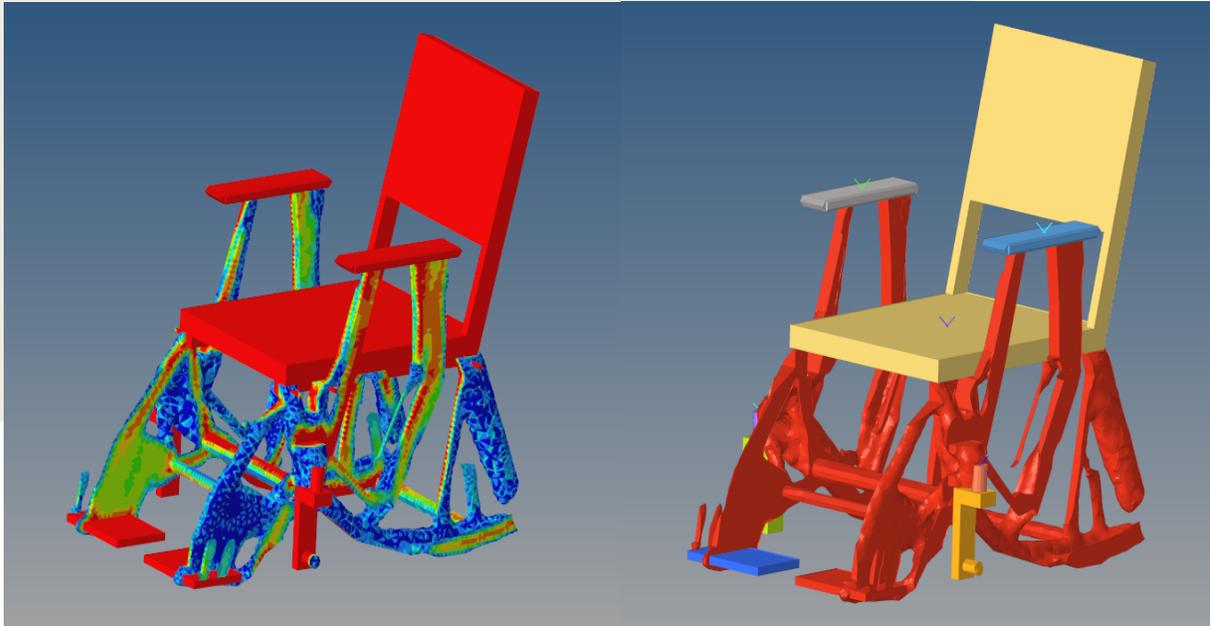


기존의 위상최적화 형상을 따라가도록 하며 새로운 Design Space를 만들어 준다.
(폭이 더 좁아지도록 모델링을 해주도록 한다.)

중간 연결 부는 주조 법으로 만들 수 없으므로 파이프를 연결하여 볼트 체결을 하는 방식을 사용하도록 한다.



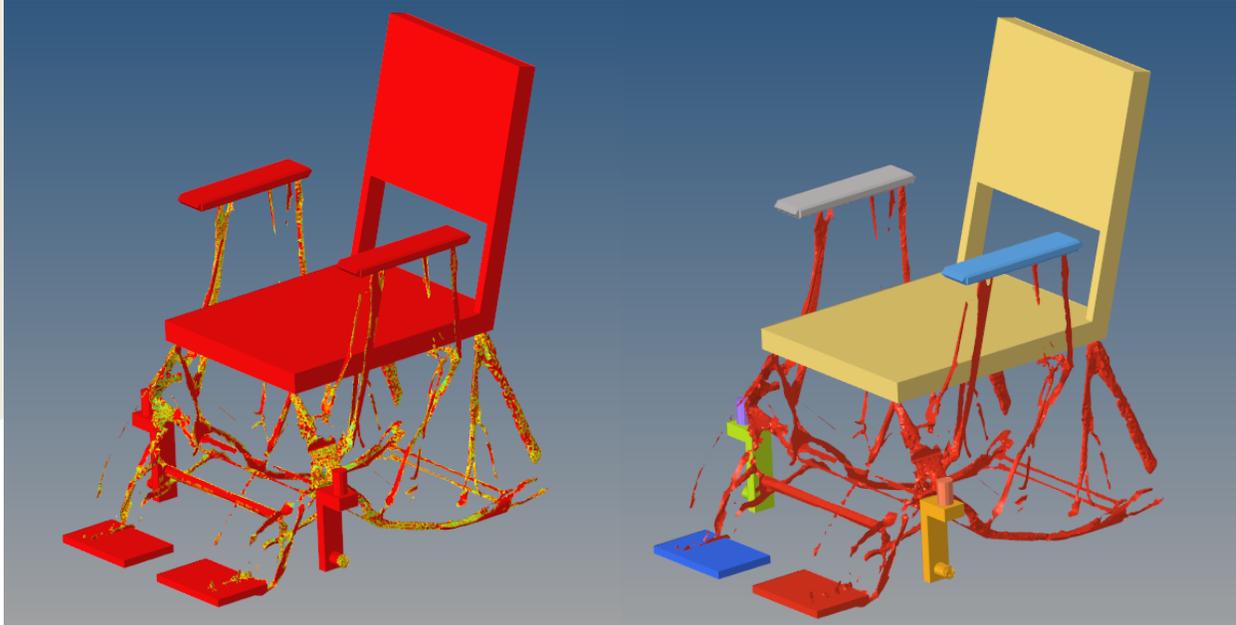
59.4 kg



Element Size: 10
Minimum Jacobian: 0.99
Mass Target: 20%
Iso value: 0.19

21.57 kg 질량감소: 76%

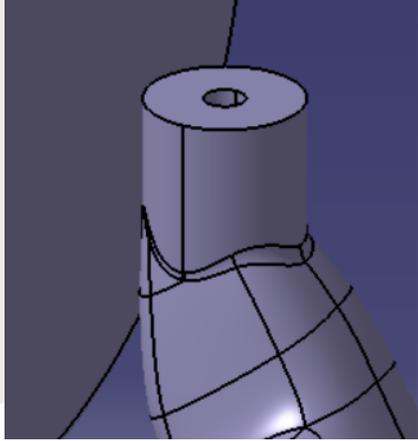
	Max Von mises[Mpa]	Safety Factor
0Degree 정자세	9.44	26.48305
0Degree 숙인자세	11.7	21.36752
0Degree 왼쪽	14.2	17.60563
0Degree 오른쪽	18.6	13.44086
10Degree 정자세	13.9	17.98561
m10Degree 숙인 자세	16.2	15.4321



5.1 kg

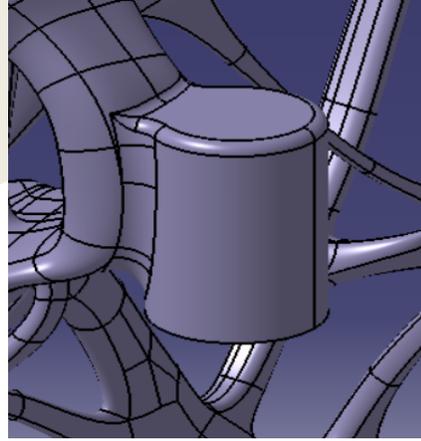
질량감소: 71%

Element Size: 5
Minimum Jacobian: 1
Mass Target: 25%
Iso value: 0.7

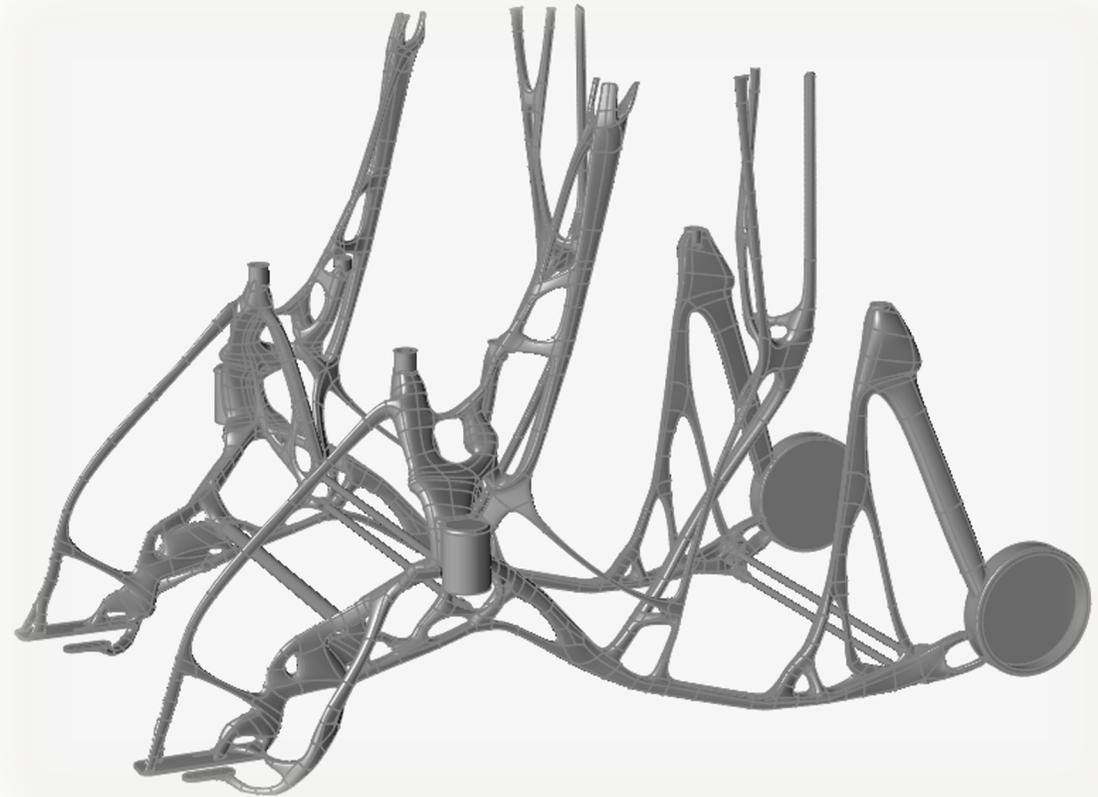


의자-프레임 체결 부
(직경 5mm M5나사)

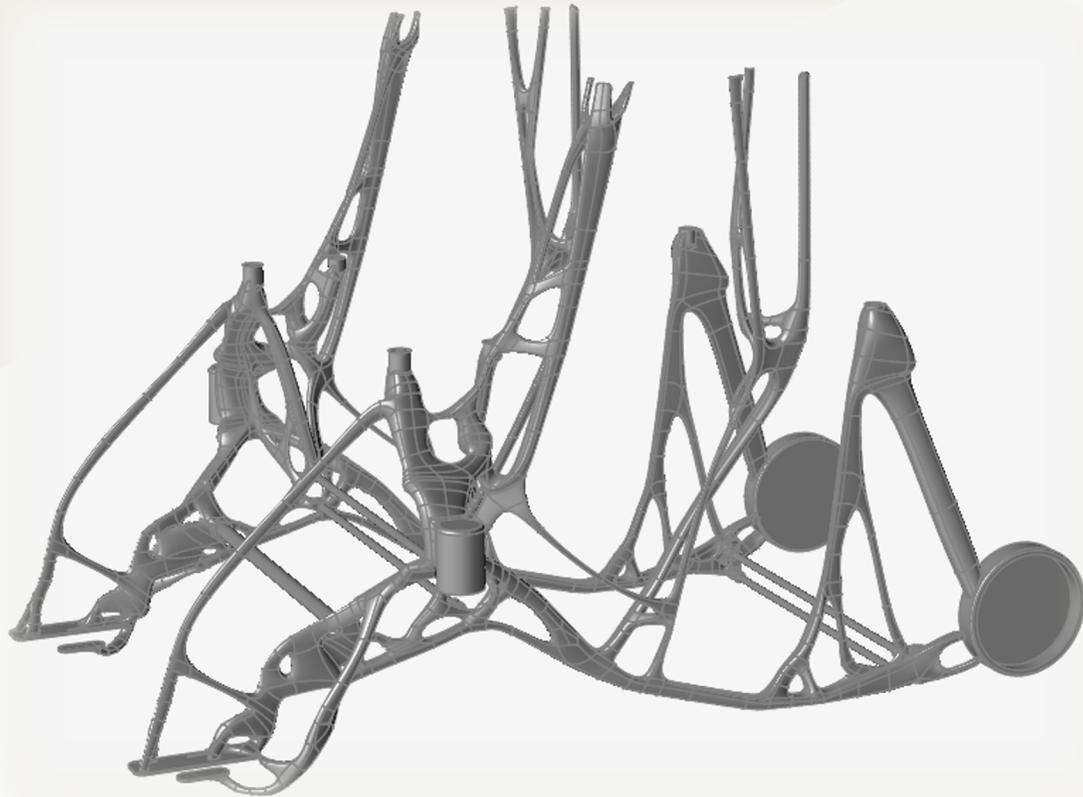
위상최적화 결과에서 의자와 프레임이 접하는 부분에 체결부 모델링



바퀴 회전축-프레임 체결 부



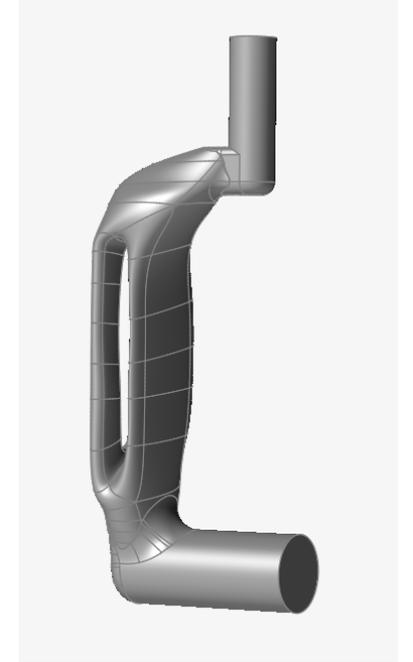
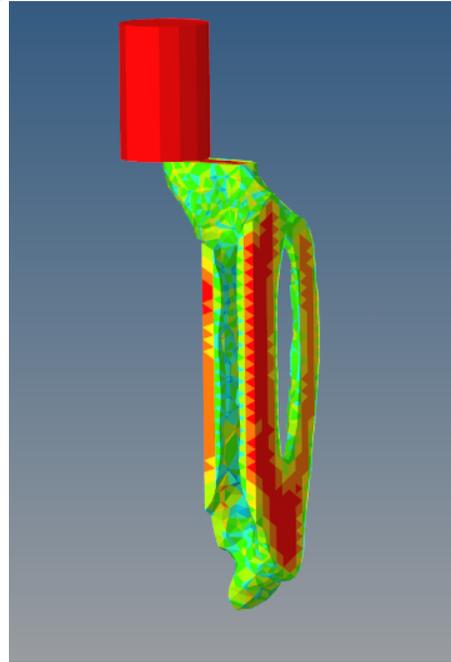
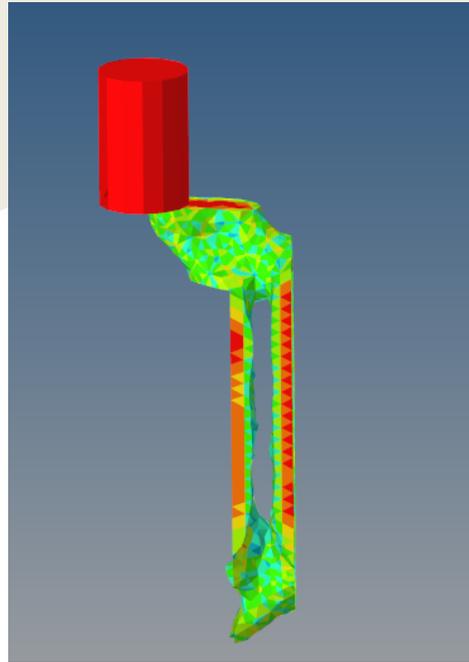
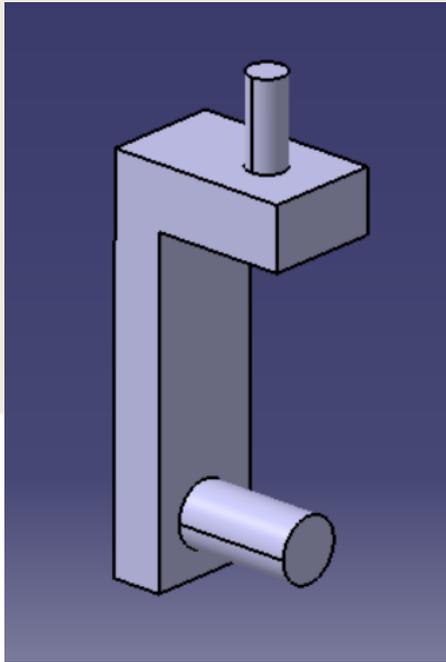
Polynurbs 처리와 함께 체결부를 모델링



5.54 kg

질량감소: 74%

	Max Von mises[Mpa]	Safety Factor
0Degree 정자세	26.9	9.29368
0Degree 숙인자세	26.6	9.398496
0Degree 왼쪽	35.6	7.022472
0Degree 오른쪽	33.8	7.39645
10Degree 정자세	42.3	5.910165
m10Degree 숙인 자세	45	5.555556



Design Variable

Objective

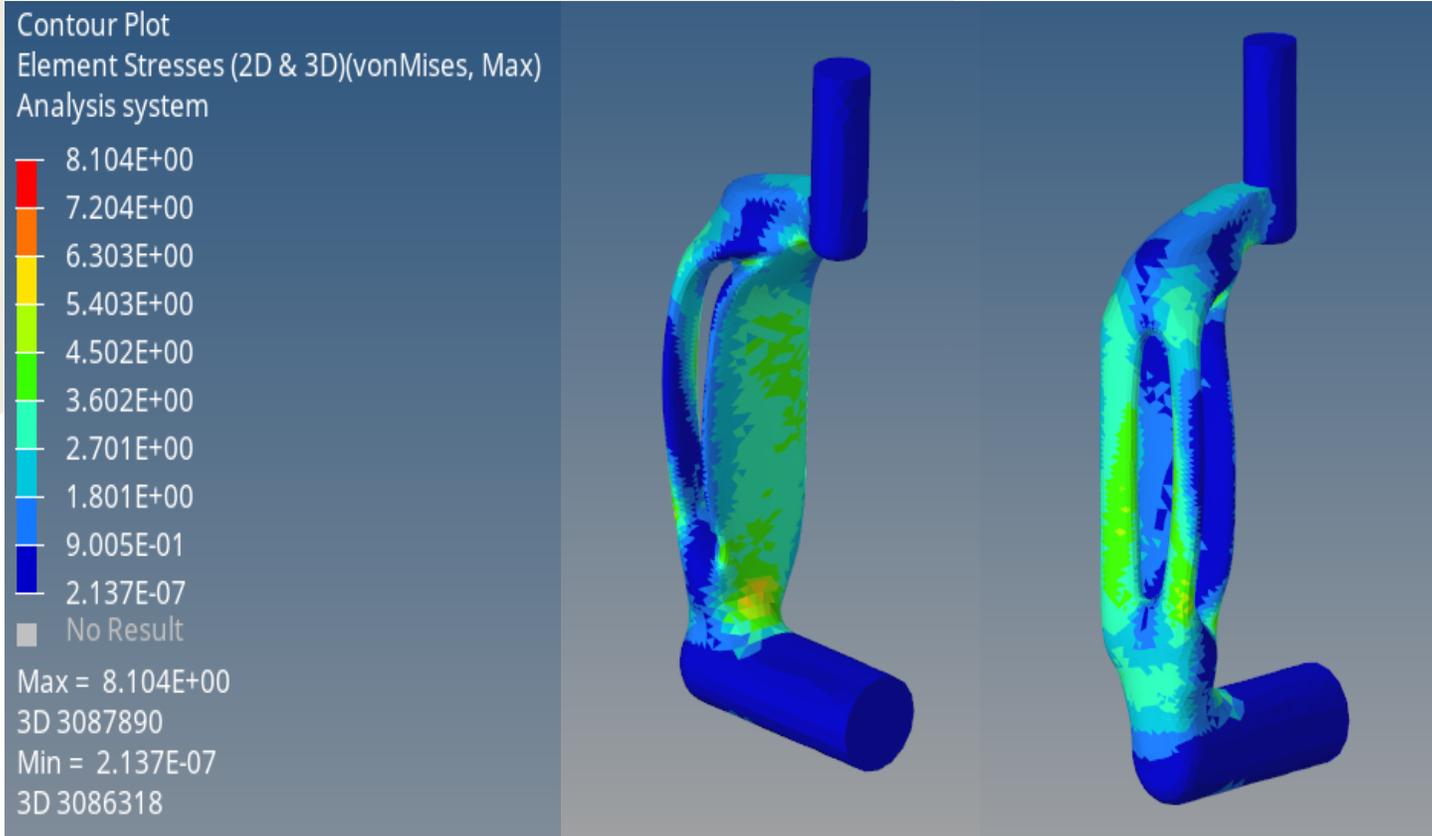
Constraints

바퀴 회전 축의 형상 밀도

Weighted compliance 최소화(강성 최대)

1. Von mises stress $\leq 83\text{Mpa}$
2. Target Mass $\leq 30\%$

Iso Value: 0.5

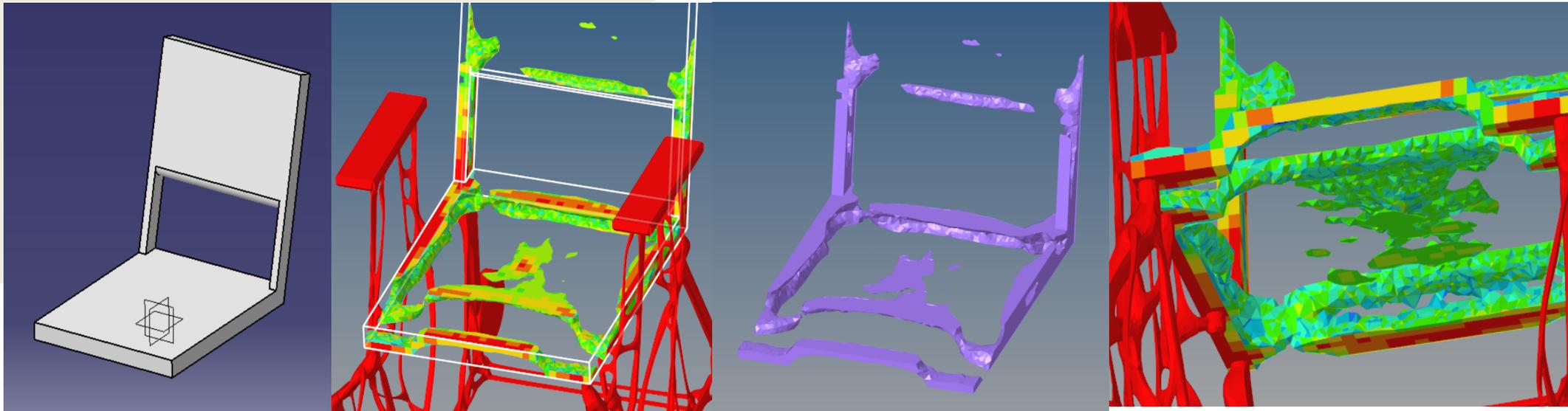


Maximum VonMises stress: 8.1Mpa

안전계수: 30

1. 위상 최적화를 진행할 경우 안전계수를 더 낮춰 질량을 더 가볍게 할 수 있으나 그 양은 전체 프레임에 비해 매우 적을 것.
2. 체결 부에 질량이 집중된 부품이기에 질량을 많이 낮추기 힘들다.

결론: 불필요하게 더 위상최적화를 진행하지 않는 것으로 판단.

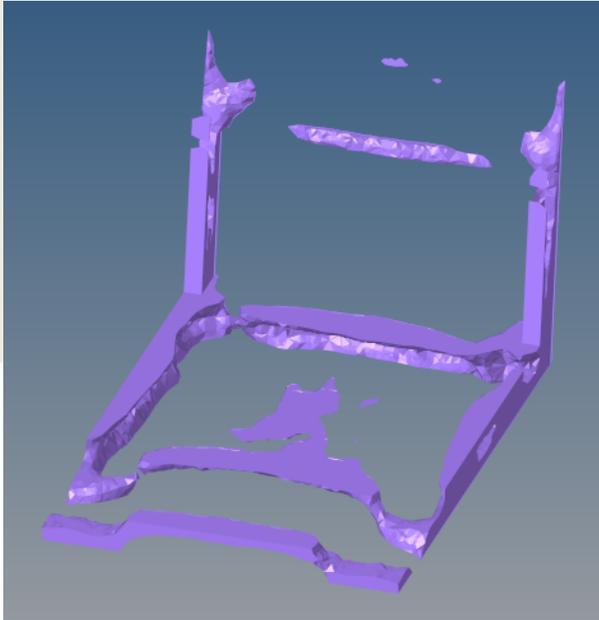


Iso Value: 0.5

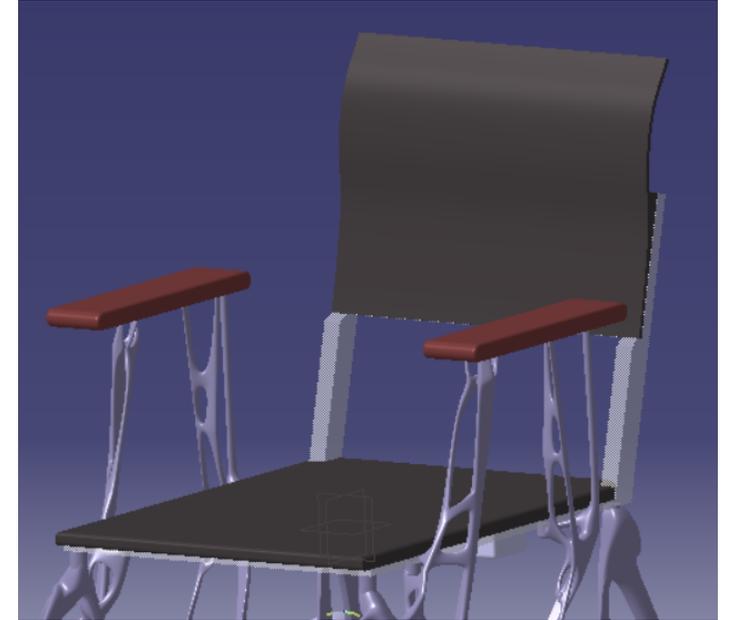
Design Variable

의자의 형상 밀도

Objective	Weighted compliance 최소화(강성 최대)
Constraints	1. Von mises stress $\leq 83\text{Mpa}$ 2. Target Mass $\leq 20\%$

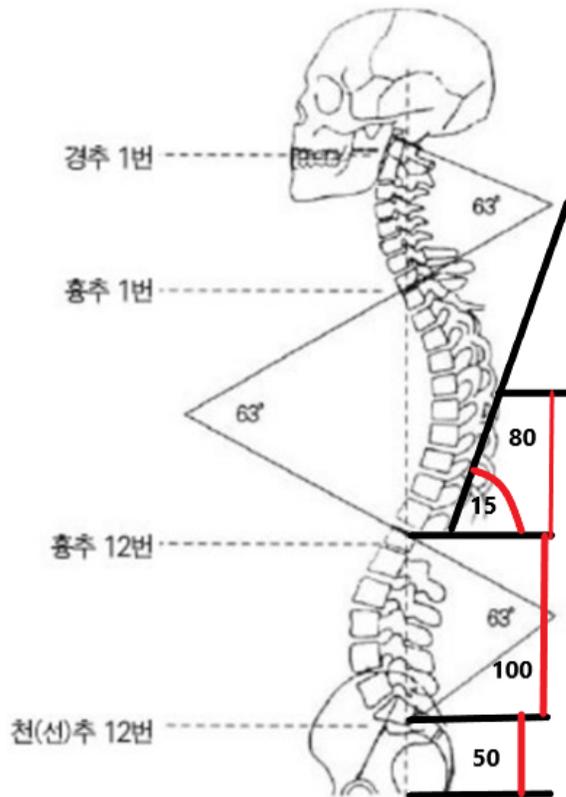


위상최적화 결과를 기반으로 의자 프레임을 모델링

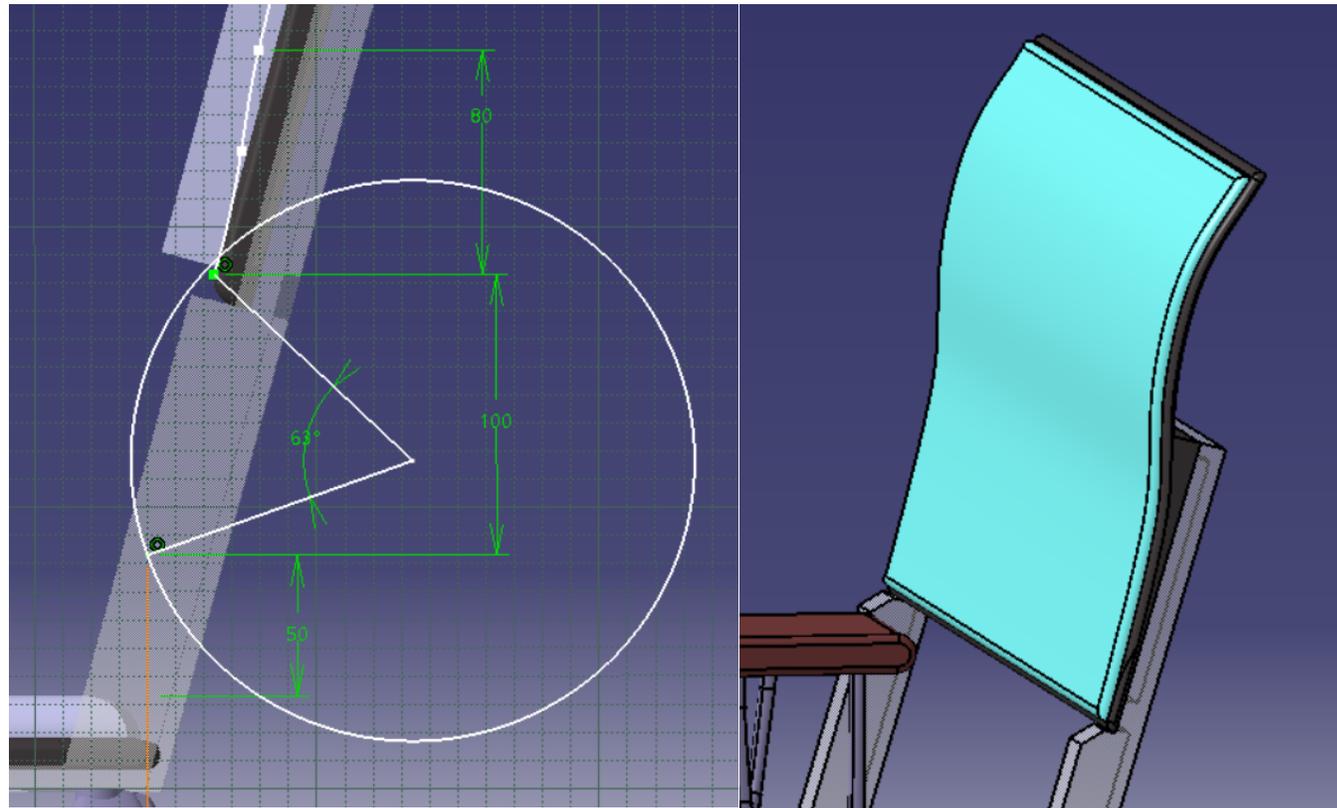


받침이 될 부분을 모델링
두께(5mm)

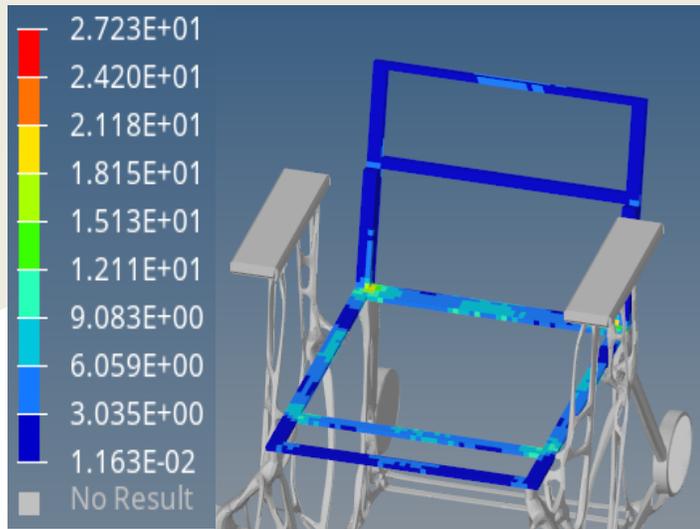
이상적인 척추



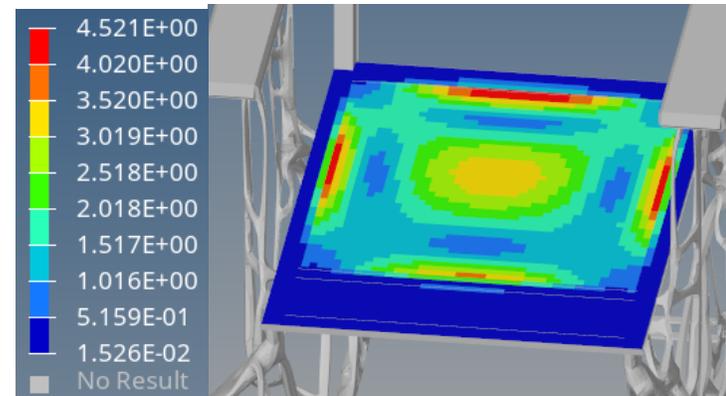
실제 흉추 간의 거리를 측정하여 모델링



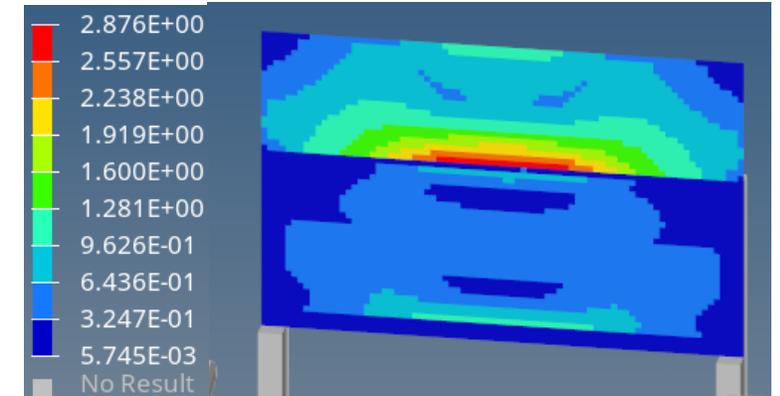
자료출처: <https://m.blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=gig515&logNo=220056332743&proxyReferer=https:%2F%2Fwww.google.com%2F>



최저 안전계수: 9.2
(경사각 0도, 숙인 자세)

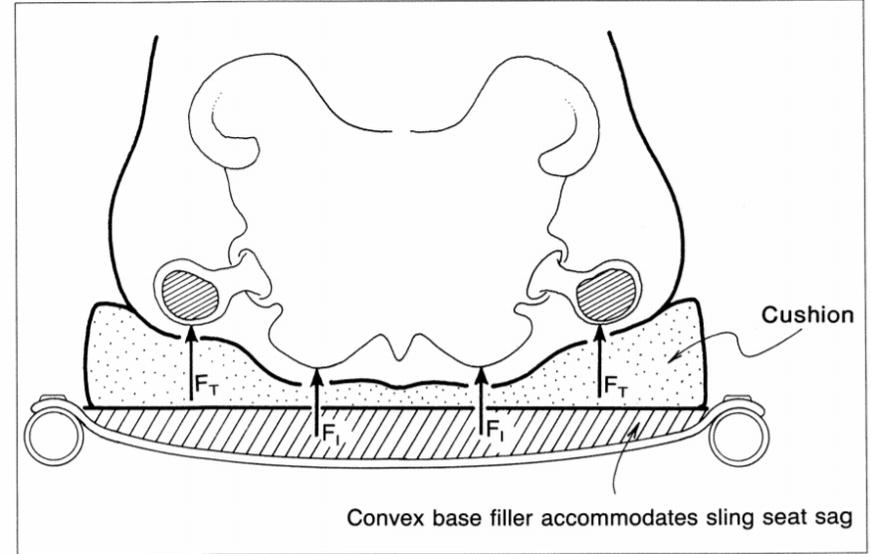
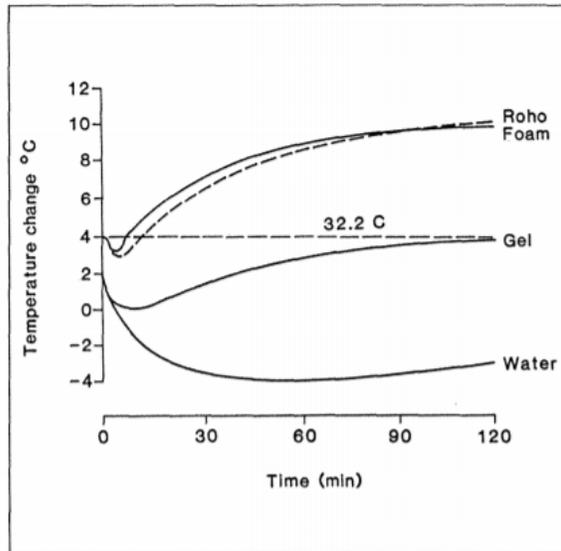


최저 안전계수: 8.9
(경사각 -10도)



최저 안전계수: 14.3
(경사각 10도)

조건 만족



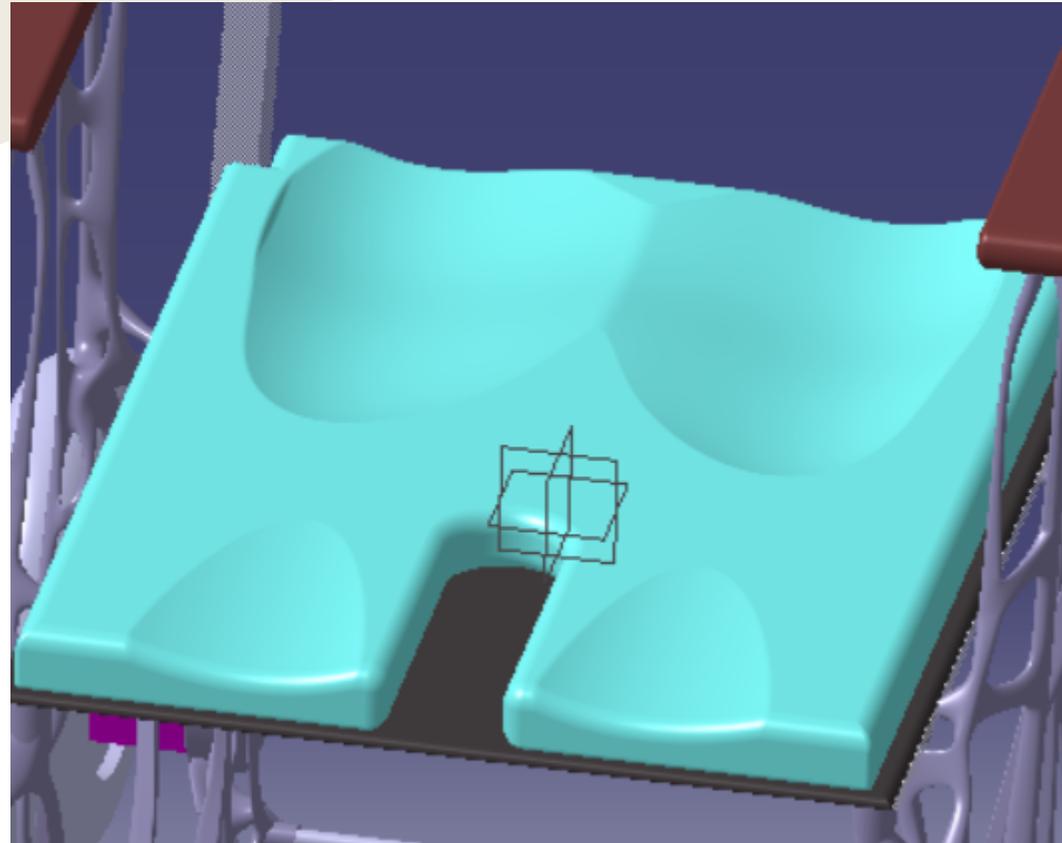
- Gel을 사용한 폼은 일반 polyurethane 폼보다 열 전달이 잘되어 오랜 시간 휠 체어에 앉아있는 사람들 에게 쾌적함을 느끼게 할수 있다.
- 인체의 형상을 본뜬 폼은 하중을 분산시켜 근육의 피로를 줄여줄 수 있다.

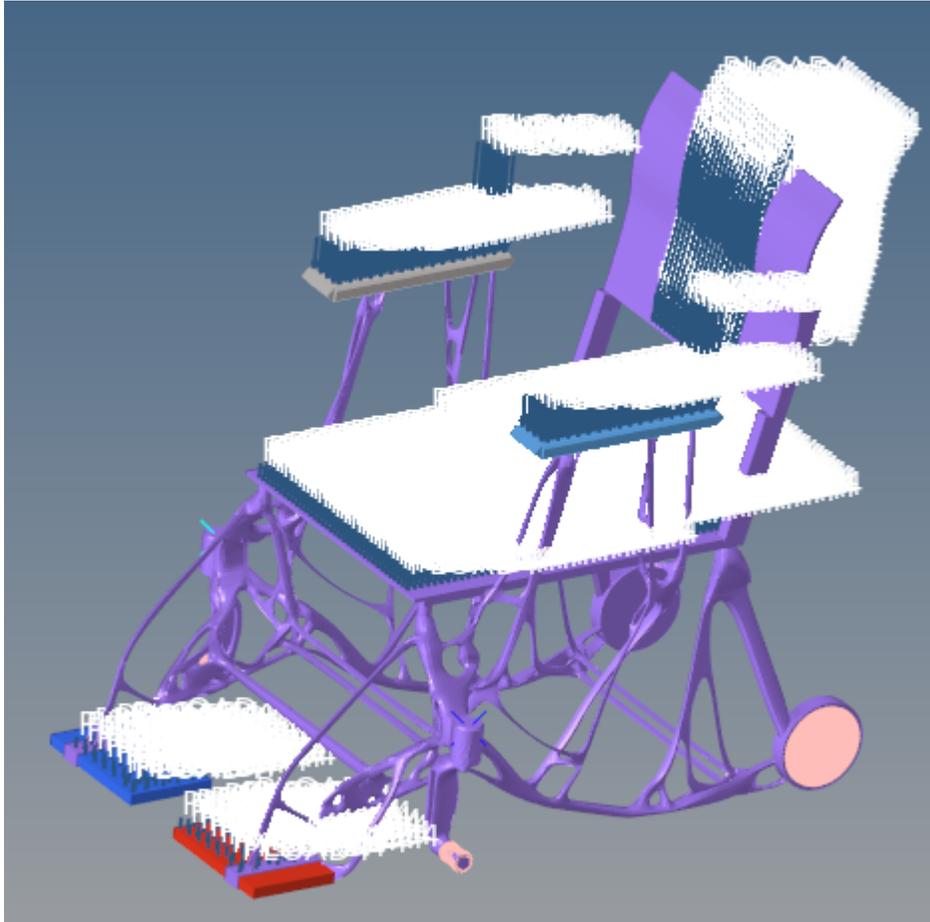
휠 체어 쿠션으로써 적합

자료출처: Technical consideration in seat cushion selection by Martin W. Ferguson-Pell

Chairframe Optimization and Analysis

Introduction Design Space Designation **Design Optimization and Analysis** Manufacturing Analysis





최종 결과물

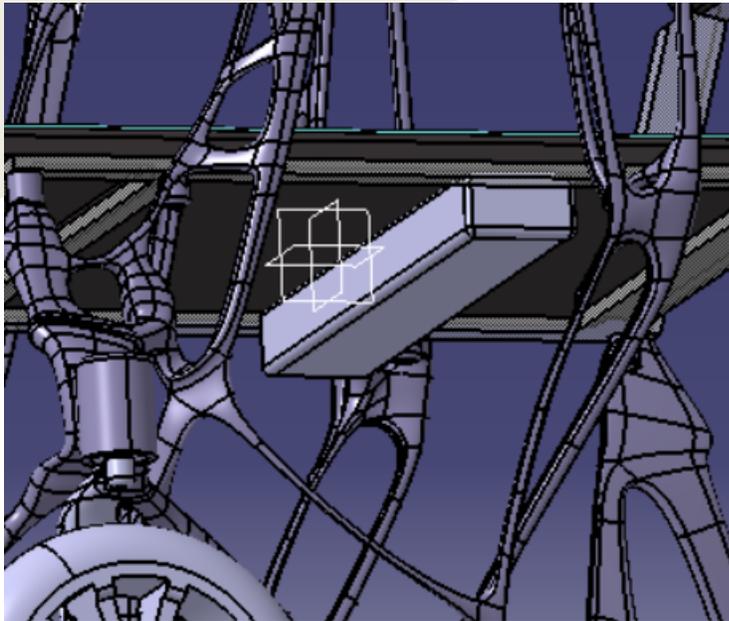
프레임: 49Mpa
안전계수: 5.1 (경사각 10도)

회전축: 22Mpa
안전계수: 11.3 (경사각 -10도)

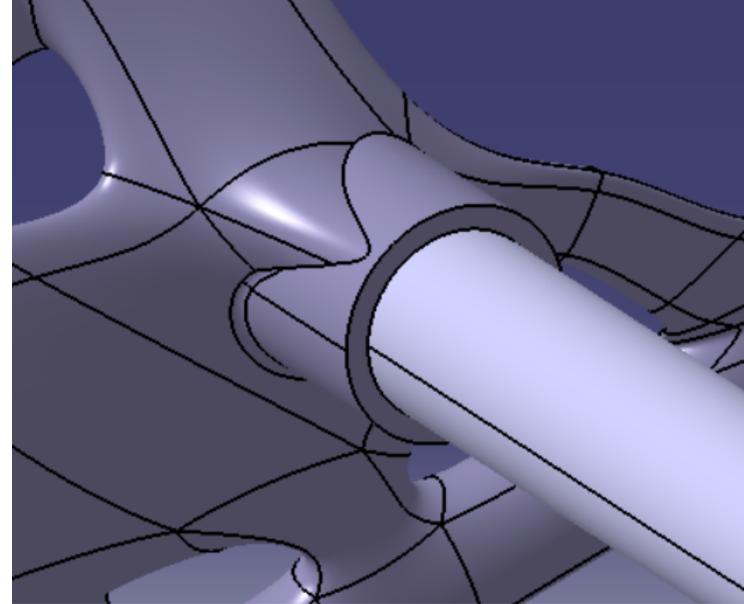
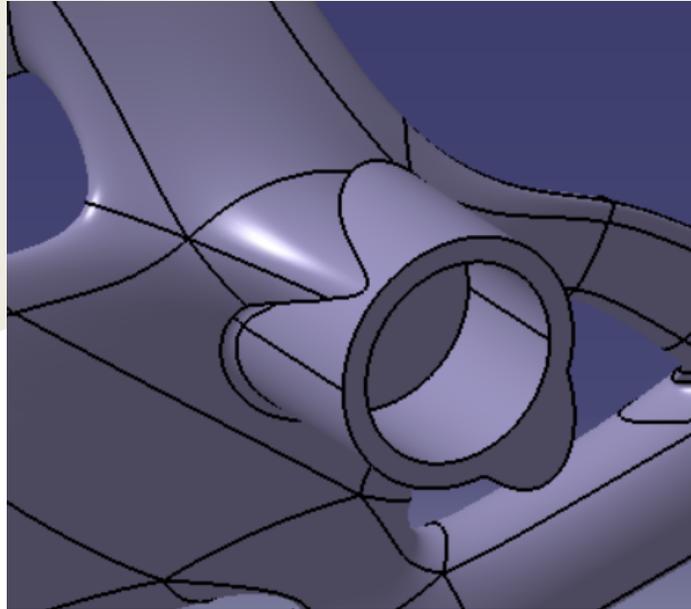
의자 프레임: 27Mpa
안전계수: 9.2 (경사각 0도 숙인자세)

플라스틱 패널: 4.5 / 2.8 Mpa
안전계수: 8.9 / 14.3 (경사각 -10도, 10도)

최저 안전계수: 5.1



무게 중심과 가까운 위치에 배터리 부착



왼쪽 프레임과 오른쪽 프레임을 연결해주는 중간 프레임을 파이프로 대체하여 체결할 수 있도록 모델링을 해준다.

アルミニウム及びアルミニウム合金継目無管 引抜管1 (参考)

Aluminium and aluminium alloys cold-drawn tubes

1070, 1050, 1050A, 1100, 1200, 3003, 3103, 3203,
5005, 5050, 5251, 5052, 5154, 5754, 5056, 5083,
5086, 6060, 6061, 6262, 6063, 6082

JIS H 4080

参考単位質量 W (kg/m)

外径 D (mm)	厚さ t (mm)																	
	0.6	0.8	1	1.2	1.6	1.8	2	2.5	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18
6	0.027	0.035	0.042															
8	0.037	0.048	0.059	0.068														
10	0.047	0.062	0.075	0.088	0.112	0.123	0.134											
12	0.057	0.075	0.092	0.108	0.139	0.153	0.167											
14		0.088	0.109	0.128	0.166	0.184	0.201	0.240										
16		0.102	0.125	0.148	0.193	0.214	0.234	0.282	0.326									
20		0.128	0.159	0.189	0.246	0.274	0.301	0.366	0.426	0.535	0.627							
30		0.195	0.242	0.289	0.380	0.424	0.468	0.575	0.677	0.869	1.05	1.20						
35			0.284	0.339	0.447	0.500	0.552	0.679	0.803	1.04	1.25	1.45						
45			0.368	0.439	0.581	0.650	0.719	0.888	1.05	1.37	1.67	1.96	2.47	2.93				
60				0.590	0.781	0.876	0.970	1.20	1.43	1.87	2.30	2.71	3.48	4.18	4.82			
70					0.915	1.03	1.14	1.41	1.68	2.21	2.72	3.21	4.15	5.02	5.82	6.55		
80						1.18	1.30	1.62	1.93	2.54	3.14	3.71	4.82	5.85	6.82	7.72	8.56	
90						1.33	1.47	1.83	2.18	2.88	3.55	4.21	5.48	6.69	7.82	8.90	9.90	10.8
100							1.64	2.04	2.43	3.21	3.97	4.72	6.15	7.52	8.83	10.1	11.2	12.3
120								2.46	2.93	3.88	4.81	5.72	7.49	9.20	10.8	12.4	13.9	15.3
140									3.44	4.55	5.64	6.72	8.83	10.9	12.8	14.7	16.6	
160										5.22	6.48	7.72	10.2	12.5	14.8	17.1		
180										5.89	7.32	8.73	11.5	14.2				
200											8.15	9.73	12.8					

単位質量 : W = 0.008 36 t (D-t) 比重 : 2.66

単位質量は参考値

감성의 알라다
saysensibility.tistory.com

1. 중실 축 대신 나사를 체결할 수 있도록 너비가 넓은 중공 축을 사용
2. 짧은 외경을 가진 중공 축을 사용함으로써 단면계수가 낮아질 수 있으므로 규격 표에서 가장 두꺼운 두께를 선정(같은 단면적을 갖는 중공 축을 사용하는 것이 아니다.)

알루미늄 및 알루미늄 합금 인발관의 규격 표

자료출처: <https://saysensibility.tistory.com/1059>

	1연결 부	2연결 부	3연결 부	4연결 부	5연결 부
면적[mm ²]	120	50.643	49	29	41.641
근사직경[mm]	12.36	8.03	7.9	6.07	7.2
단면계수	185	50	48	22	37

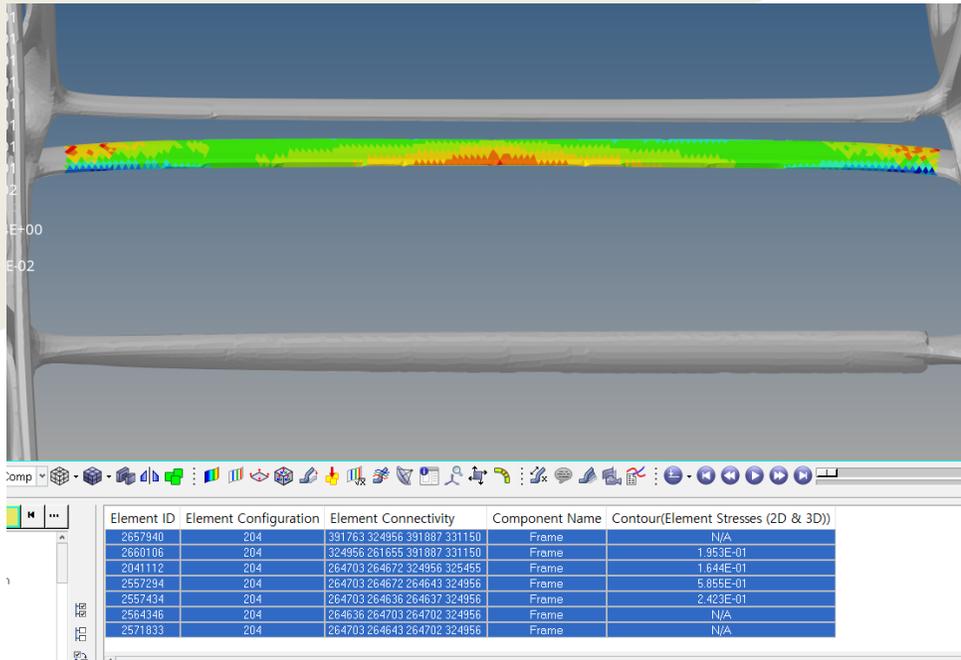
1. 위상 최적화된 모델의 중간 연결 부 단면계수(굽힘 강성)

외경	내경	단면적	단면계수[cm ³]
6	4	15.7	17.008333
8	5.6	25.6224	38.177376
10	6	50.24	85.408
12	8	62.8	136.06667
14	9	90.275	223.26942
16	10	122.46	340.59188

2. 파이프(중공 축)의 단면계수

	원단면계수	파이프 외경	파이프 단면계수
1연결 부	185	14	223
2연결 부	50	8	38
3연결 부	48	8	38
4연결 부	22	8	38
5연결 부	37	8	38

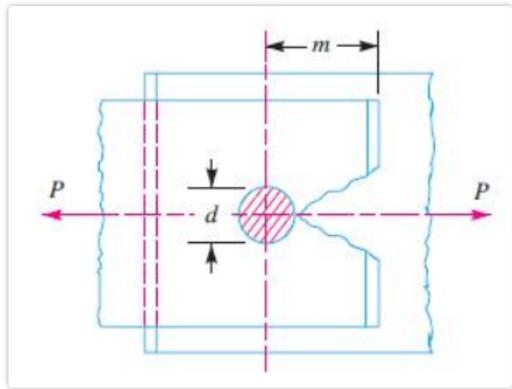
단면계수가 비슷하거나 그 이상인 파이프를 선정한다.



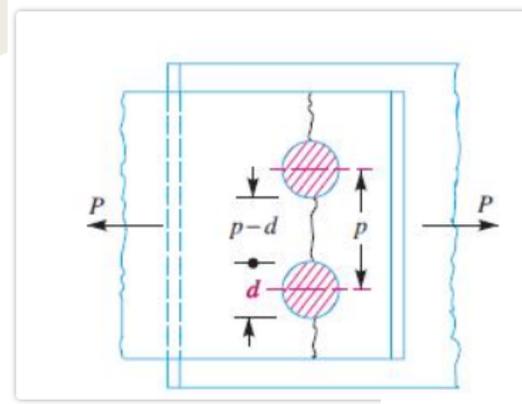
중간 연결 부 평균 응력해석

	1연결부	2연결부	3연결부	4연결부	5연결부
정자세	0.193	0.561	0.204	0.297	0.125
숙인자세	0.411	0.762	0.664	0.57	0.365
왼쪽	0.329	1.52	0.653	0.688	0.409
오른쪽	0.344	1.6	0.687	0.708	0.484
10도(정자세)	0.229	1.24	0.577	0.546	0.236
m10도(숙인자세)	0.429	1.79	1.13	0.98	0.12
원 단면적[mm^2]	120	50.643	49	29	41.641
힘[N]	51.48	90.65097	55.37	28.42	4.99692

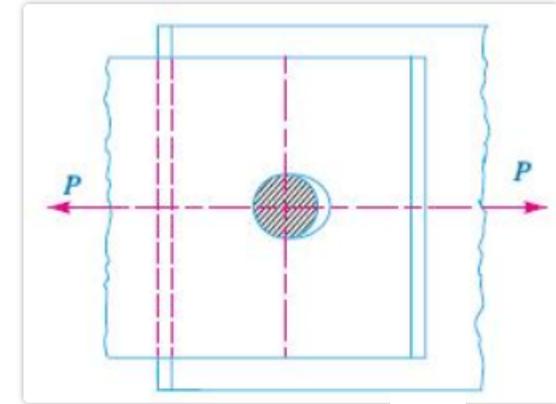
외경 14, 8파이프에 가해질 최대 평균 응력 / 힘을 분석한다.



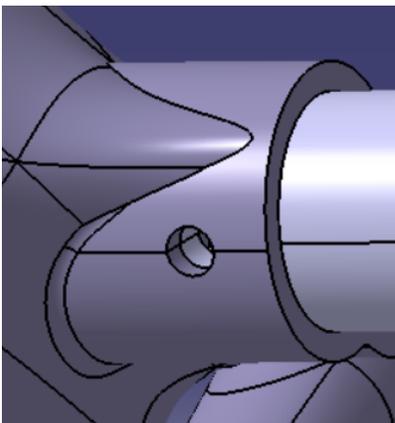
1. 판 끝 갈라짐 파괴응력: $\frac{3(W \cdot d)}{t(2e-d)^2}$



2. 판의 절단 파괴응력: $\frac{W}{(p-d)t}$



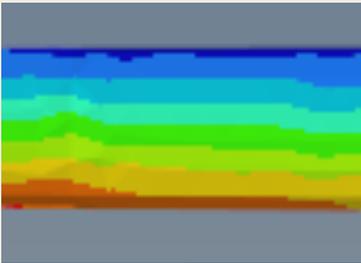
2. 판의 압축 파괴응력: $\frac{W}{t \cdot d}$



깊이 5mm에 체결, 나사는 M3나사이므로 $e=5\text{mm}$, $d=3\text{mm}$, $p=(\text{외경}+\text{내경})/2$

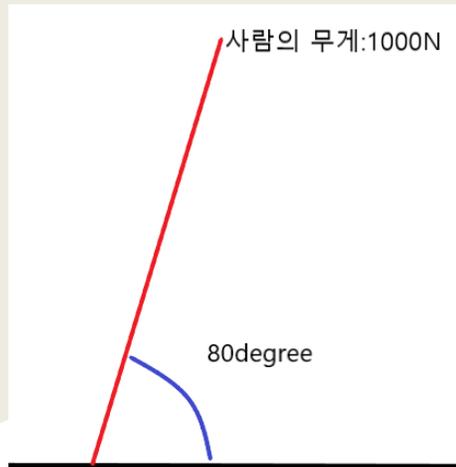
파이프 외 프레임의 체결부는 더 긴 직경과 두께를 가지므로 파이프보다 더 높은 안전계수를 가질 것이다.

자료출처: <https://mechanicalinfo.wordpress.com/tag/riveted-joint-failures/>

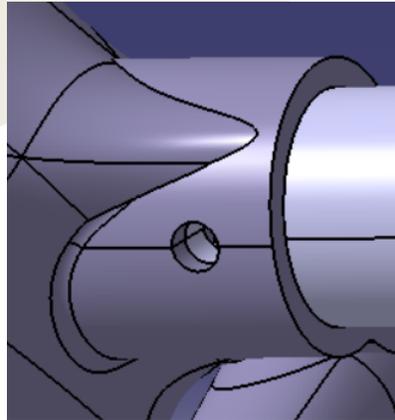


굽힘 응력에 의해 판재/나사에 평균 응력의 최대 3배의 응력이 가해질 수 있다고 가정

	절단 파괴	압축 파괴	갈라짐 파괴
직경 14mm	1.367784789	6.864	3.782204082
직경 8mm	9.841280181	25.18055556	5.55
3배-14	4.103354367	20.592	11.34661224
3배-8	29.52384054	75.54166667	16.65
안전계수	8.467733039	3.309431881	15.01501502



의자-프레임



파이프-프레임

의자-프레임 하중: $\frac{1000}{8} * \cos(80) * 3 = 65N$
(8= 나사 수, 3= load case에 따라 3배 하중이 가해질 수 있다고 가정)
(나사 직경= 5mm(의자), 3mm(파이프))

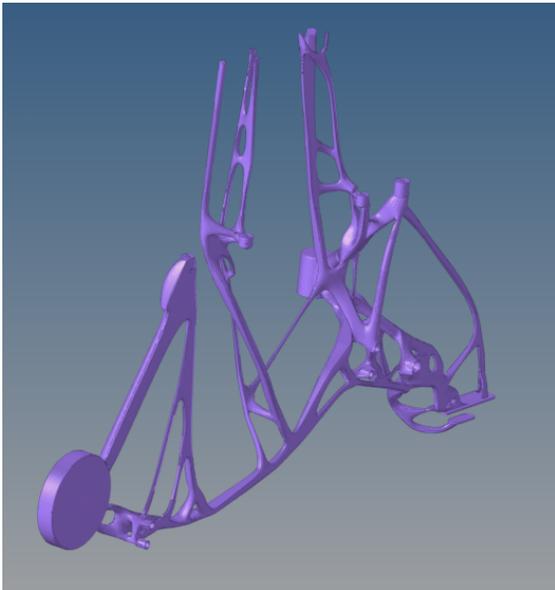
파이프-프레임 최대 하중: 91N

나사 내 전단응력: 3.3Mpa, 12.8Mpa

최저 안전계수: 19

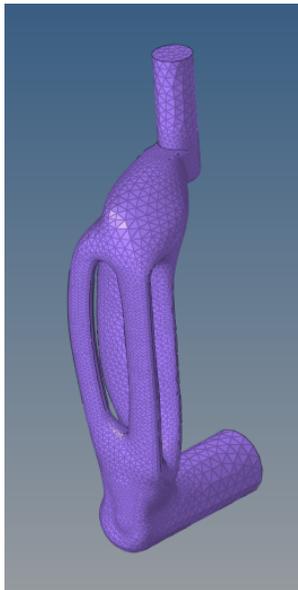
의자-프레임의 체결나사 내의 전단응력과 파이프-프레임 체결나사의 전단응력 안전계수를 구한다.

모터 진동수: 15.7Hz



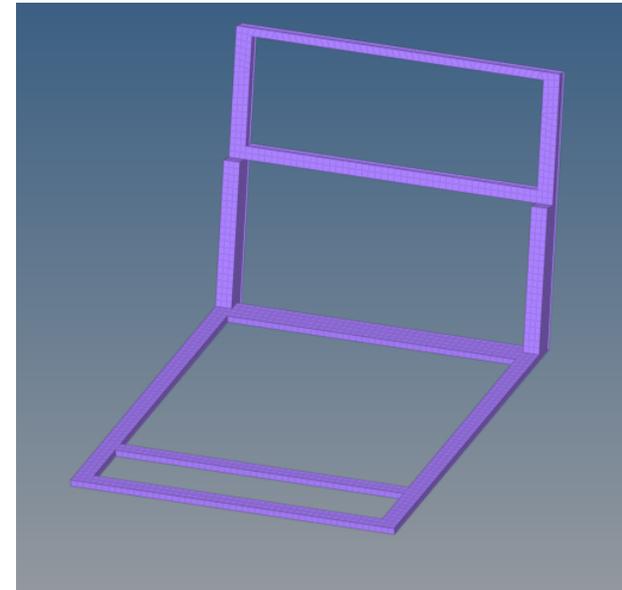
Half Frame(조건 만족)

Mode	Frequency
1	2.063570E+01
2	2.410224E+01
3	2.816242E+01



Shaft(조건 만족)

Mode	Frequency
1	1.850257E+03
2	1.856672E+03
3	2.637011E+03

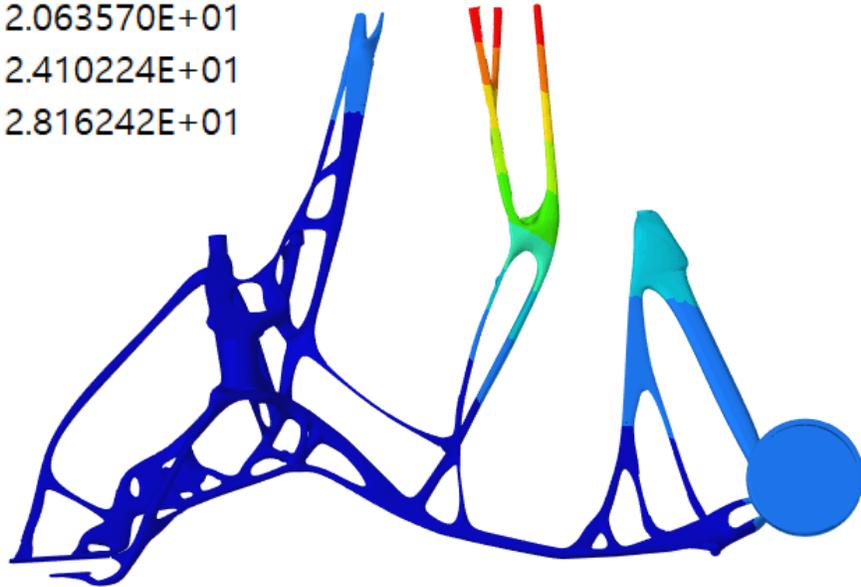


Chair frame(조건 만족)

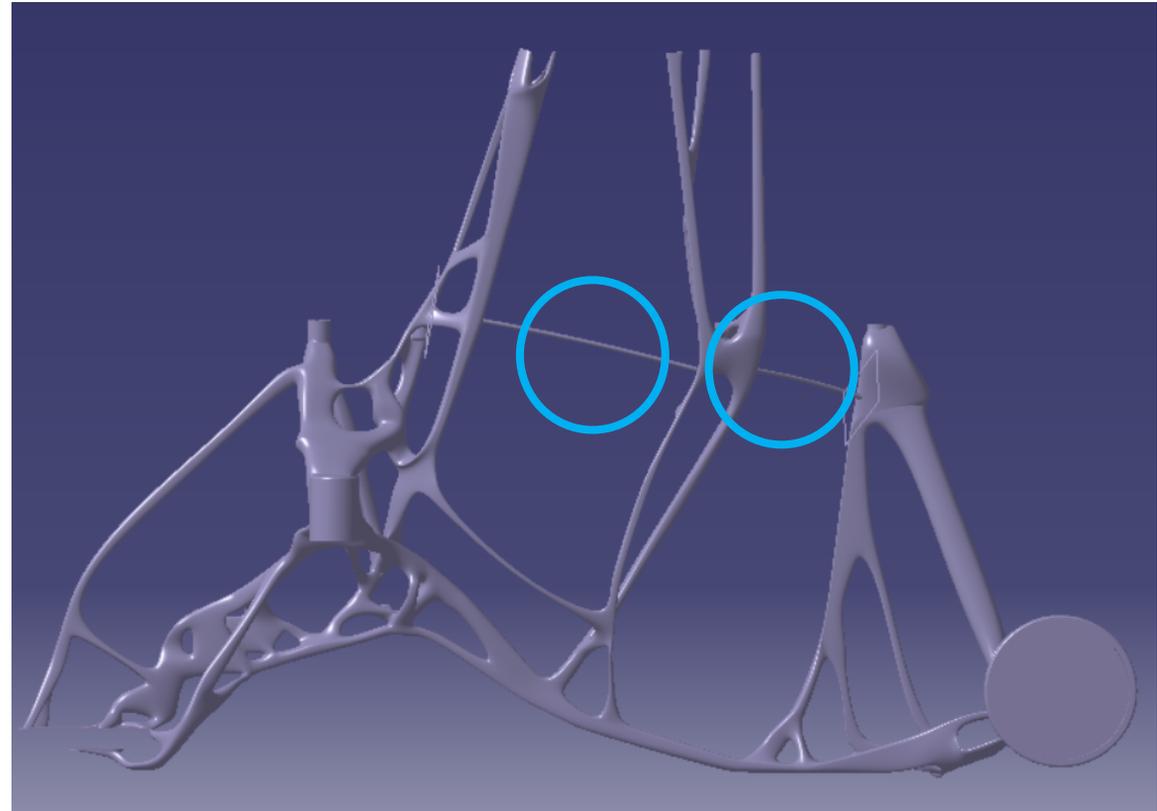
Mode	Frequency
1	6.701678E+01
2	9.317006E+01
3	9.475892E+01

Mode Frequency

- 1 2.063570E+01
- 2 2.410224E+01
- 3 2.816242E+01

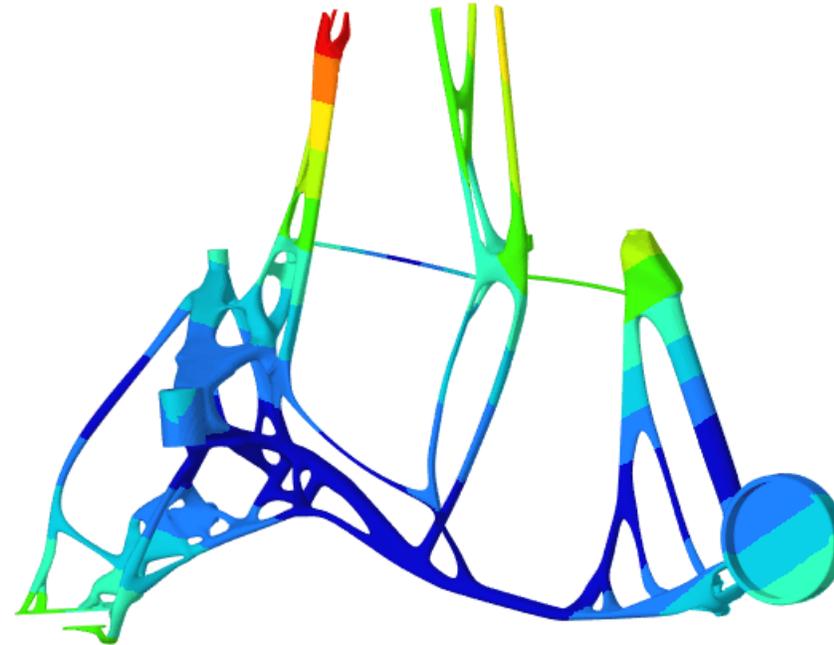


1차 모드: 20.6Hz



프레임 질량: 5.2kg -> 5.4kg

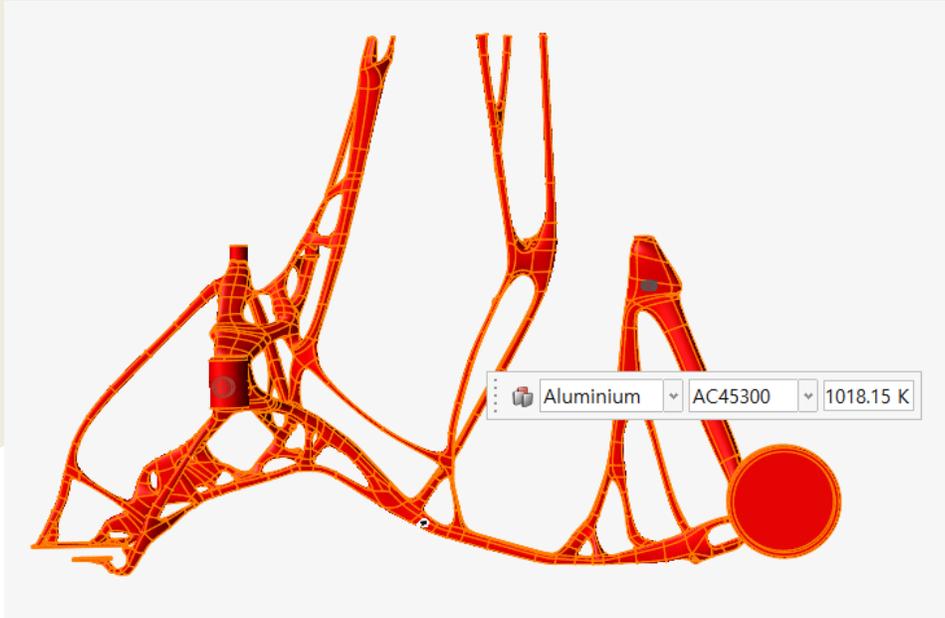
Mode	Frequency
1	3.273189E+01
2	4.472547E+01
3	5.606746E+01
4	7.879260E+01
5	1.173580E+02



**1차 모드: 32.7Hz
(58.7% 증가)**

A 3D rendering of a white, porous lattice structure, possibly a honeycomb or similar cellular design, set against a light blue background. The structure is composed of interconnected, curved beams forming a complex, repeating pattern.

Manufacturing Analysis



| 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.

EN AC-45300-T6 Cast Aluminum

EN AC-45300-T6 is EN AC-45300 aluminum in the T6 temper. To achieve this temper, the metal is solution heat-treated and artificially aged until it meets standard mechanical property requirements. The graph bars on the material properties cards below compare EN AC-45300-T6 to: Euronorm (EN) cast aluminums (top), aluminum alloys (middle), and the entire database (bottom). A full bar means this is the highest value in the relevant set. A half-full bar means it's 50% of the highest, and so on.

Elastic (Young's, Tensile) Modulus

71 GPa 10 x 10⁶ psi

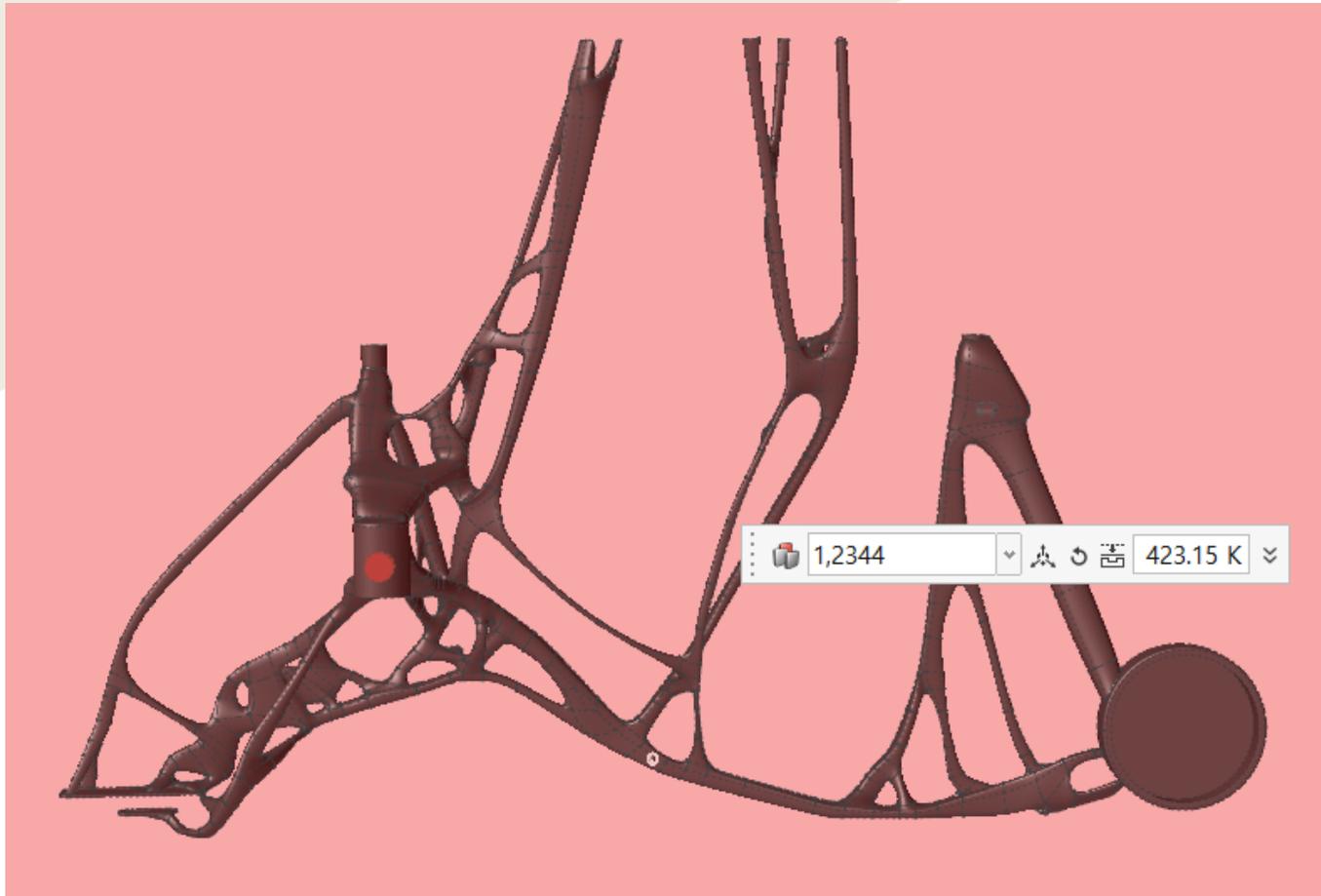
Tensile Strength: Yield (Proof)

230 MPa 34 x 10³ psi

Density

2.7 g/cm³ 170 lb/ft³

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

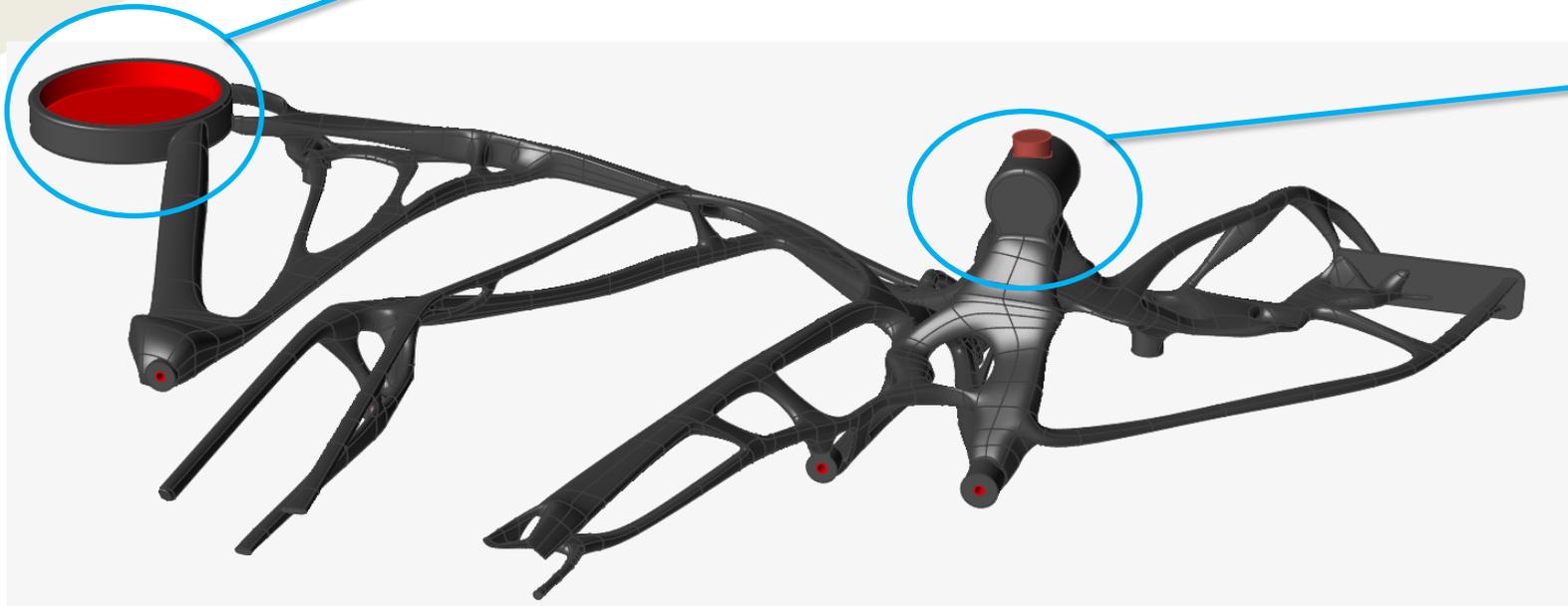


| 몰드 재질

○ 몰드는 Inspire Cast High Pressure Casting tutorial 에서 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

Frame cast Component



| Body frame 캐스팅 설정

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

고압 프로세스 매개변수

위상 변경

기본 설정

초기 속도 0.5 m/s 2차 위상 속도 2.5 m/s 위상 변경 지점 선택

샷 슬리브 사용

채워진 슬리브

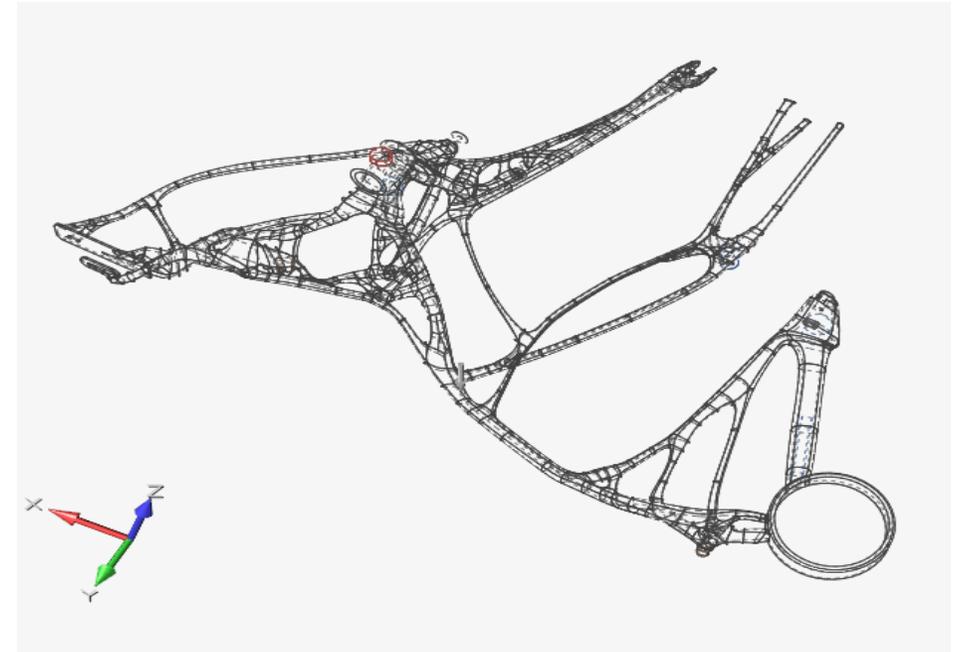
질량 0 kg

슬리브 채움 % 60

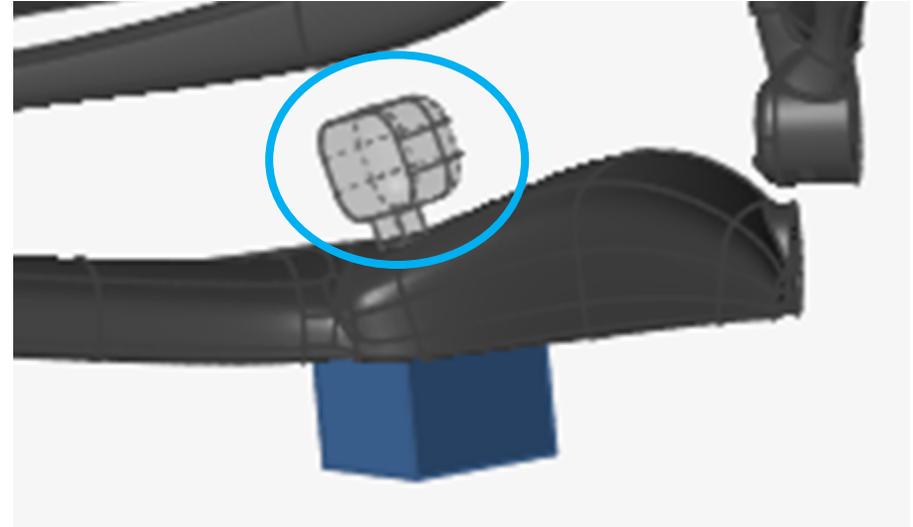
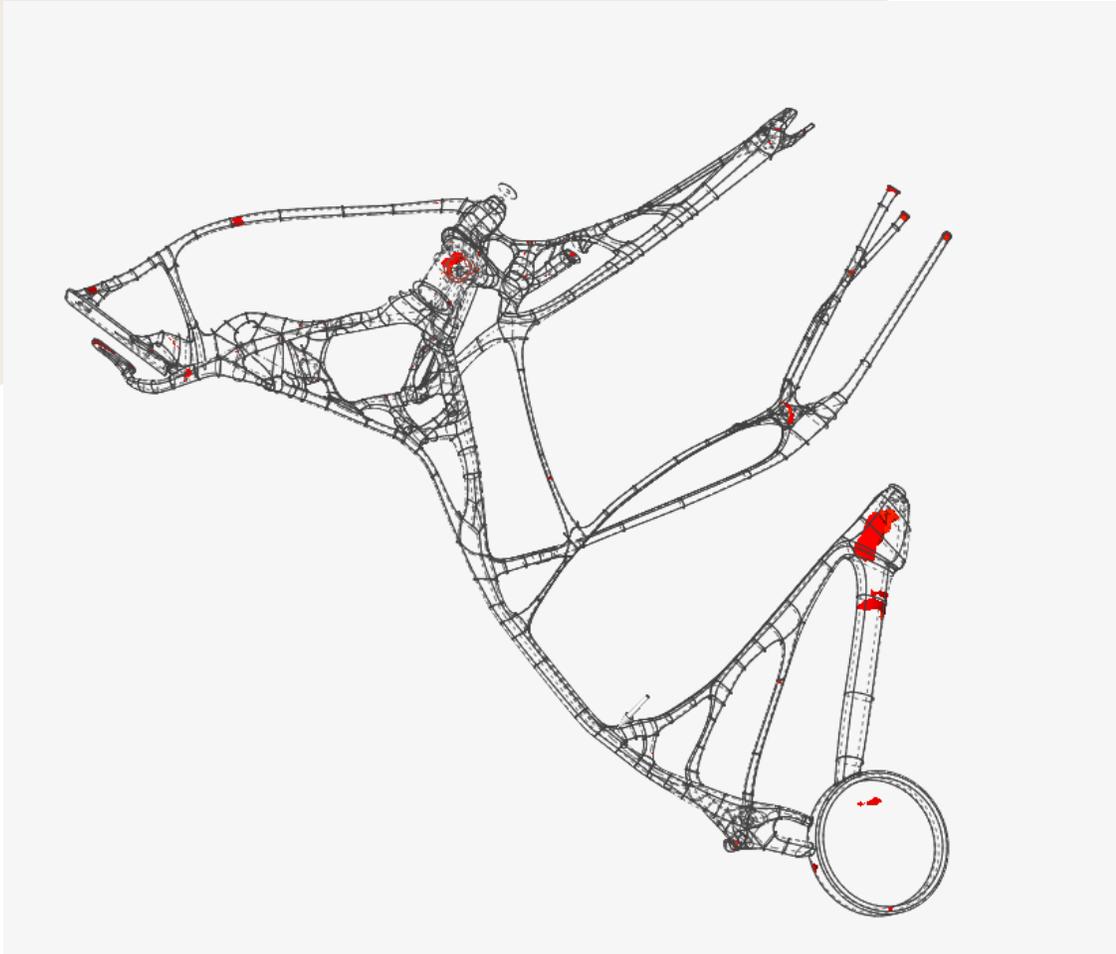
피스톤 속도 제어 By position

길이 (m)	속도 (m/s)
1 0.0	0.5
2 0.1	0.5
3 0.2	2.5
4 0.3	2.5

파트 체적: 0.0009813 m³ - 게이트 면적: 0.0003142 m² - 초기 온도: 1018 K
밀도: 2430 kg/m³

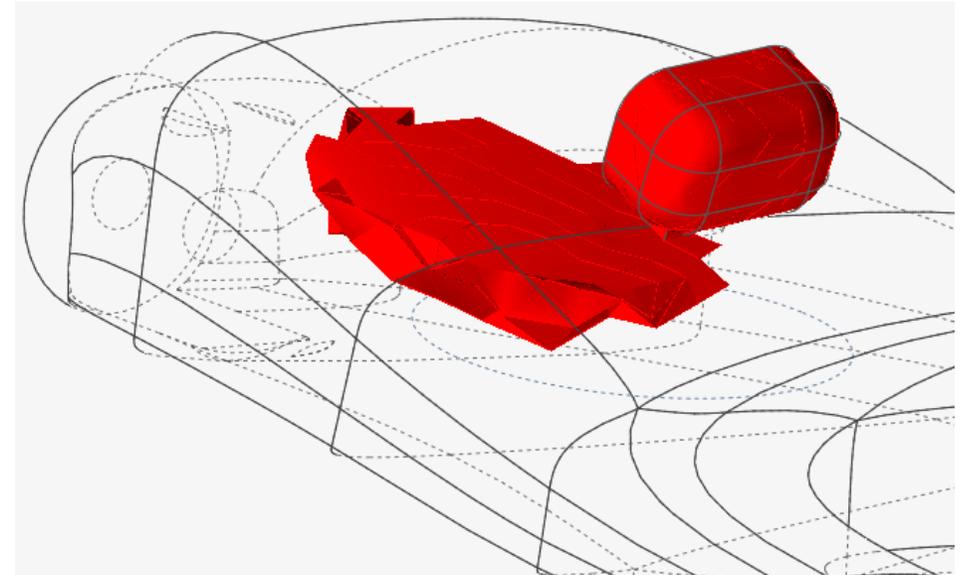
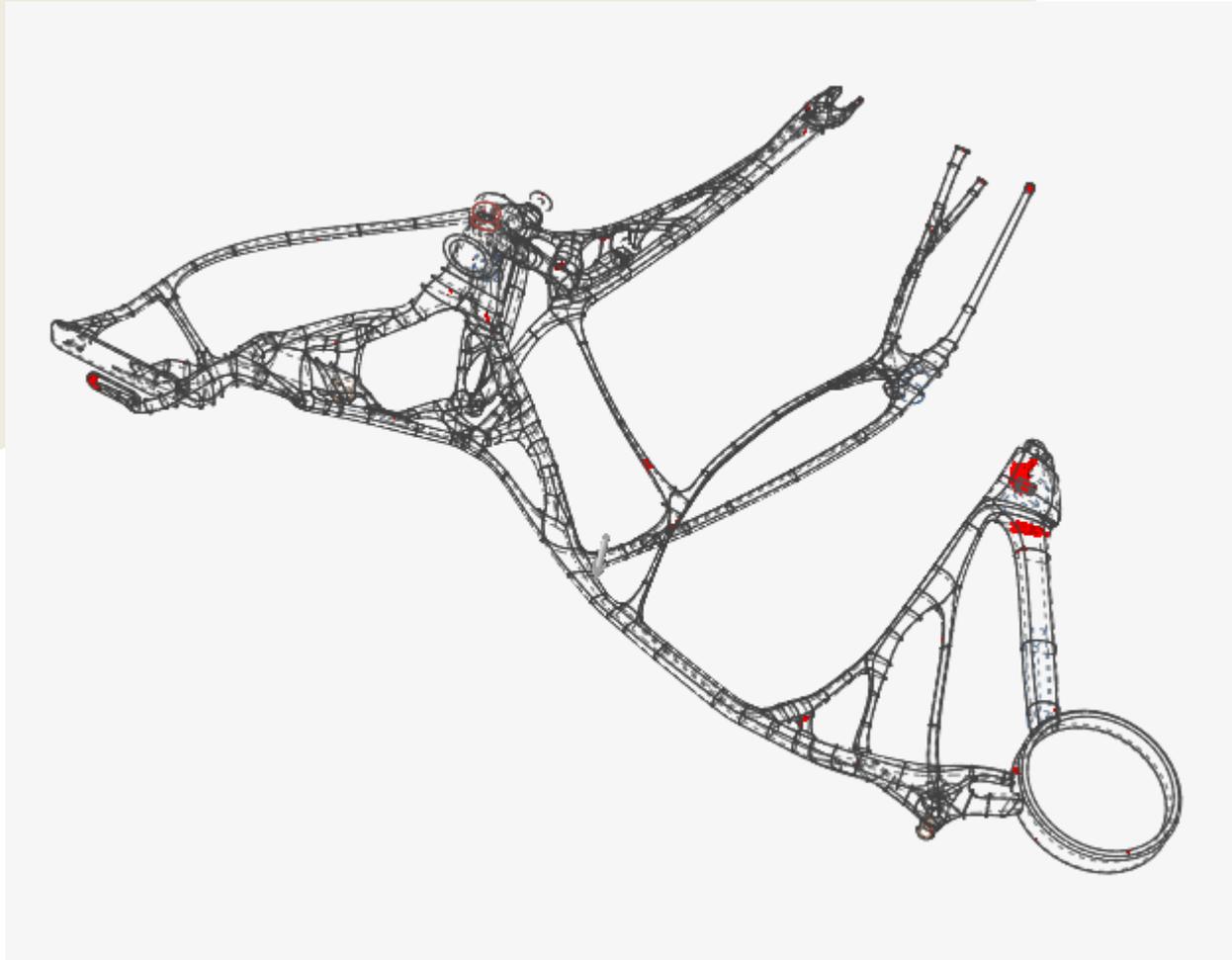


- Flow velocity가 상승하는 지점을 디자인했던 ingate의 끝으로 설정
- 영상 확인 시, ingate의 디자인이 적절하여 Laminar flow가 제대로 들어가는 것 확인 가능.



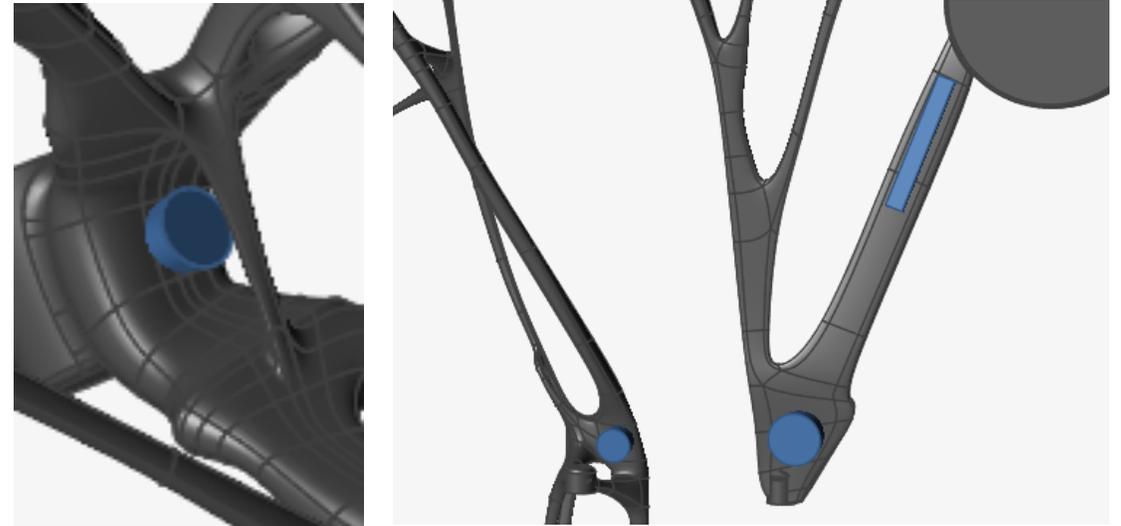
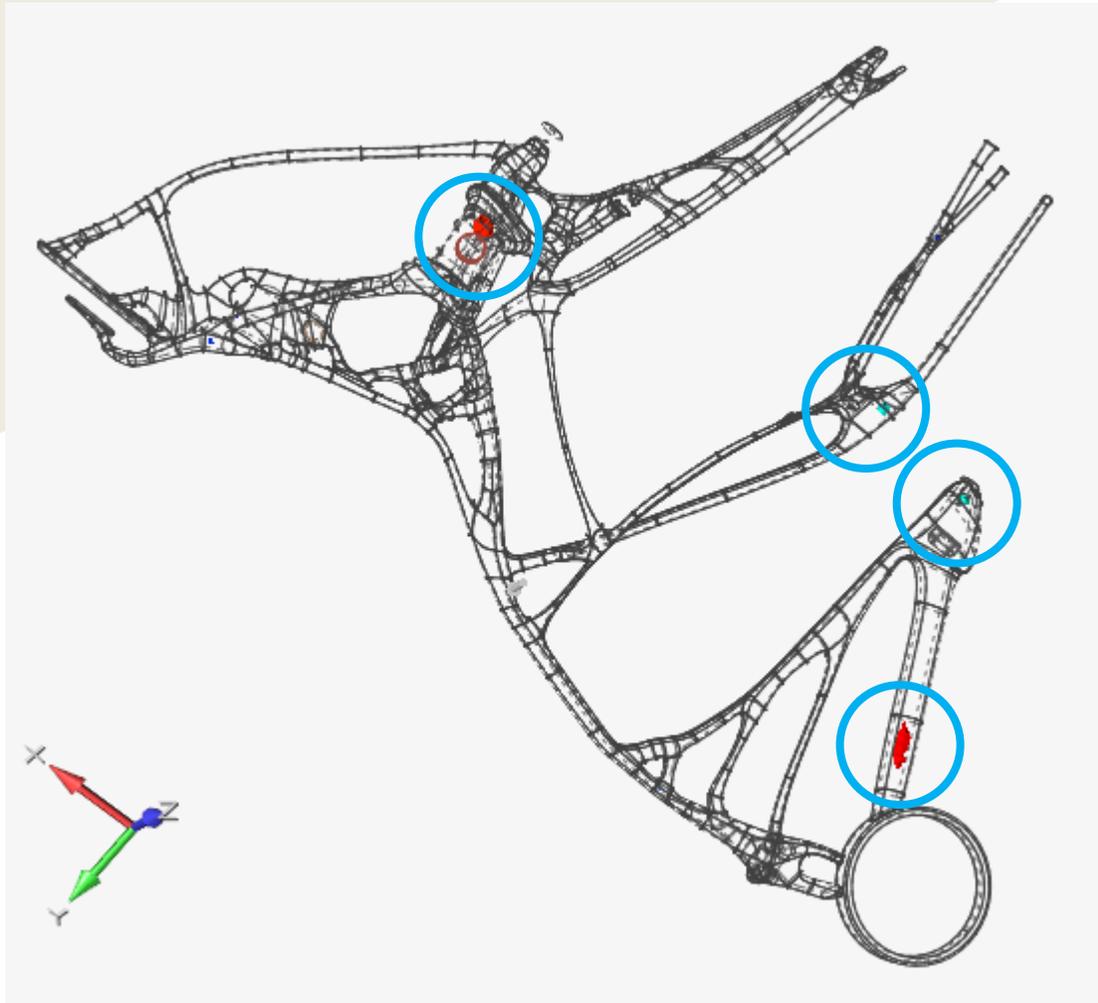
| Last air 개선

- 1차 캐스팅 해석 결과에 따라 Last air가 심한 곳을 발견.
- Last air가 심한 곳에 overflow를 부착하여 Last air 제거 필요



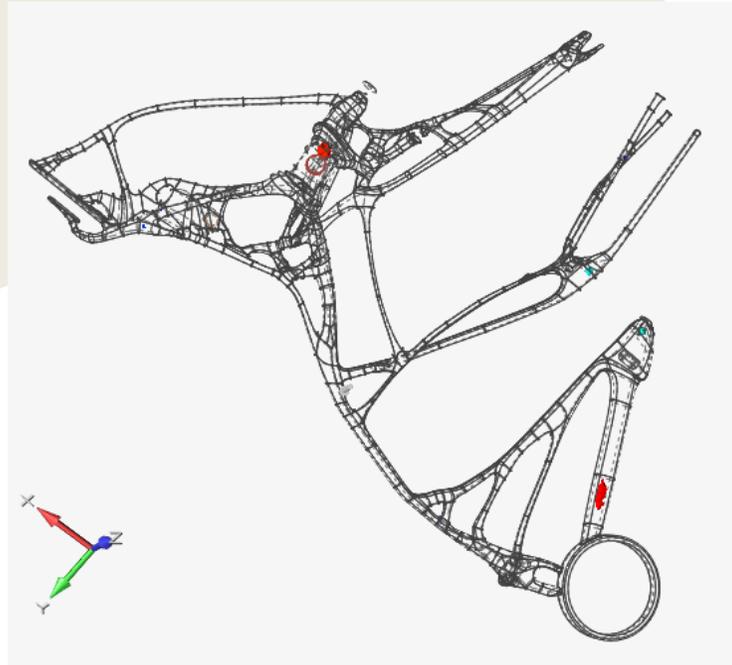
| 개선 결과

- Overflow를 부착하여 Last air가 빠져나감을 확인 가능.

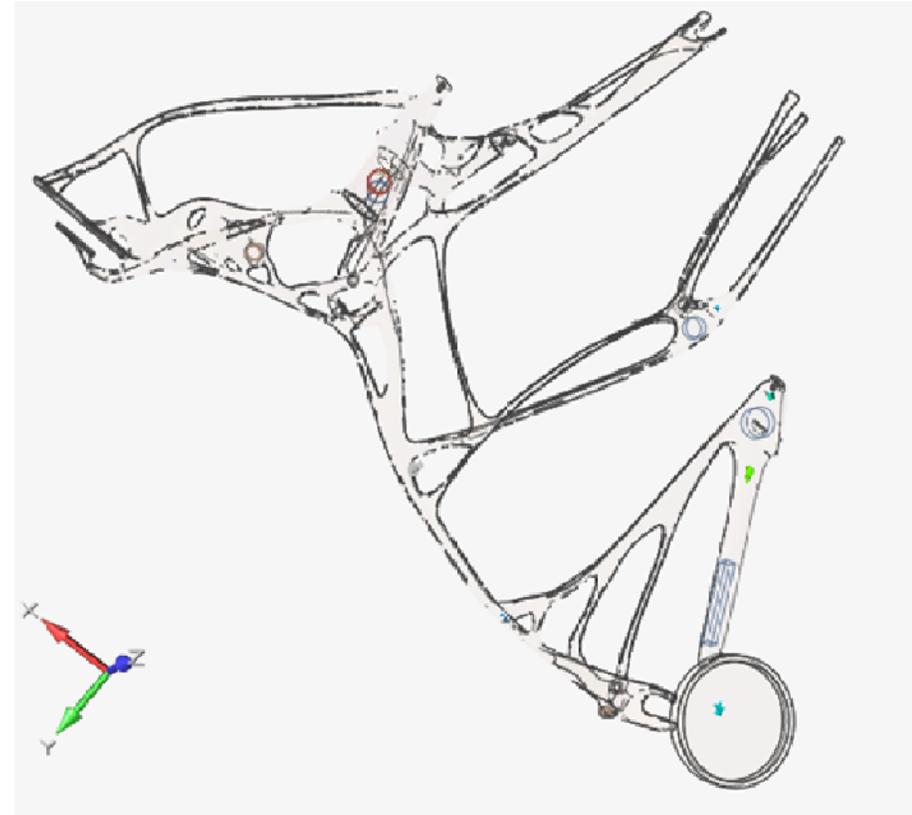


Shrinkage volume 개선

- 1차 캐스팅 해석결과 크게 4곳에서 volume shrinkage 발생.
- Chiller를 부착하여 Solidification time이 줄어들 수 있도록 조치



Chiller 부착.



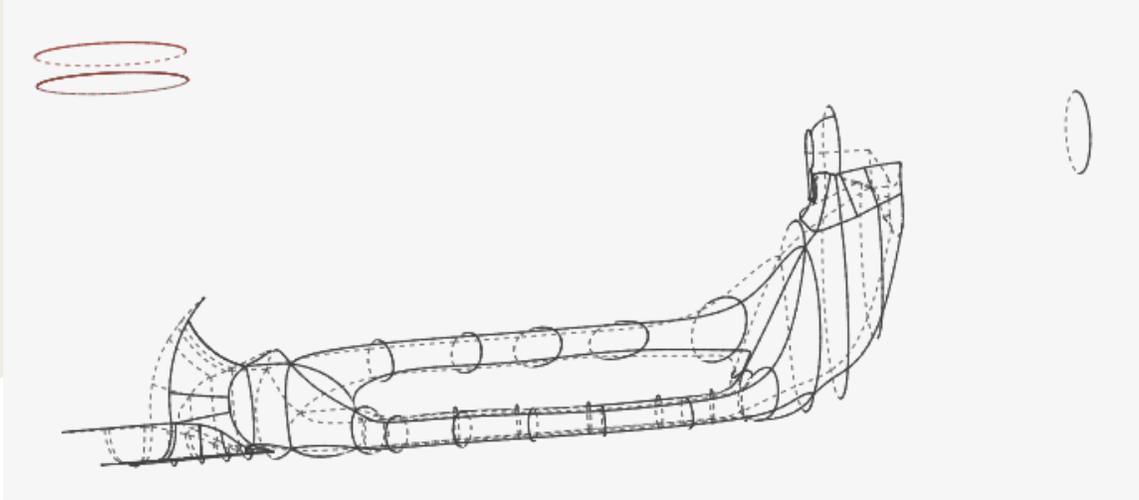
개선 결과

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

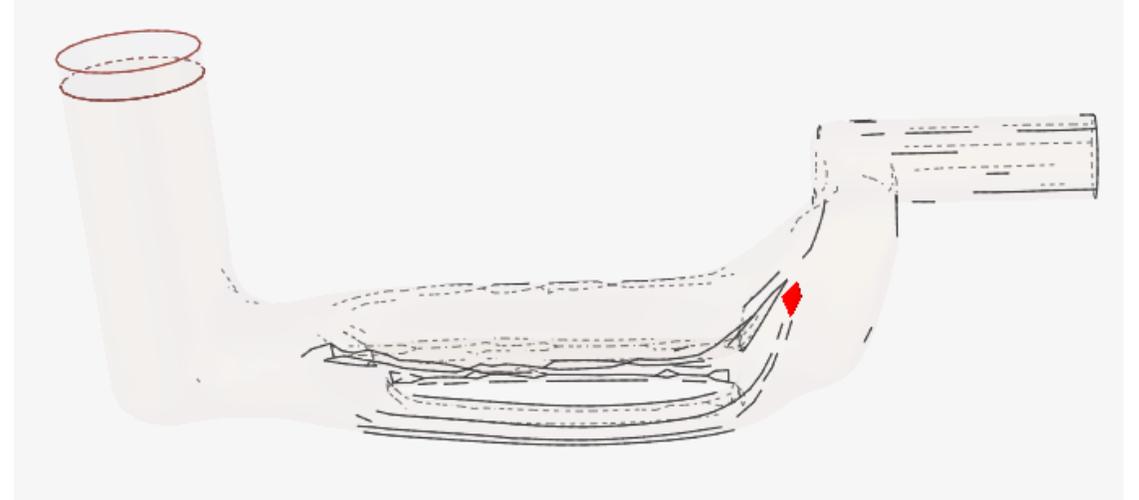


| Shaft 캐스팅 설정

- Ingate를 반경이 큰 부분에 배치하여 디자인
- 구조가 복잡한 형상이 아니므로 기본설정.



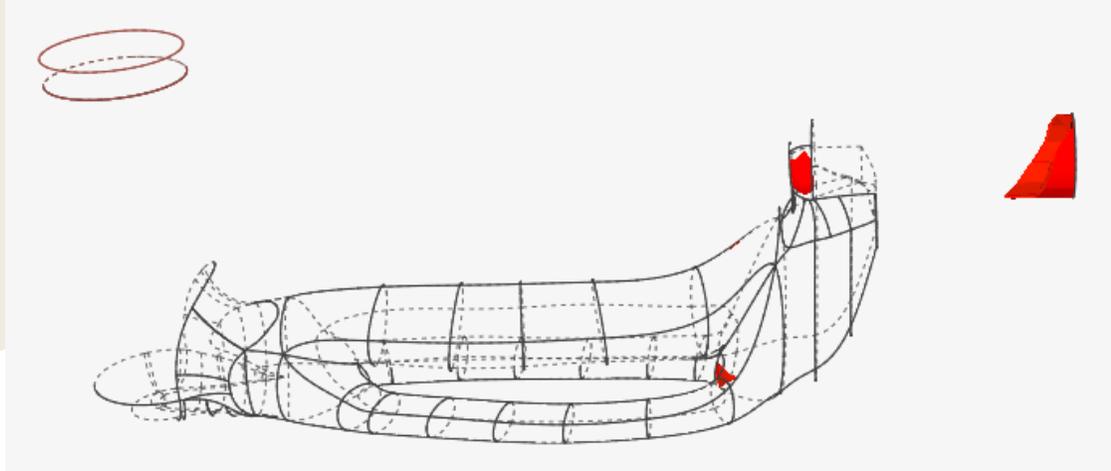
공기흐름



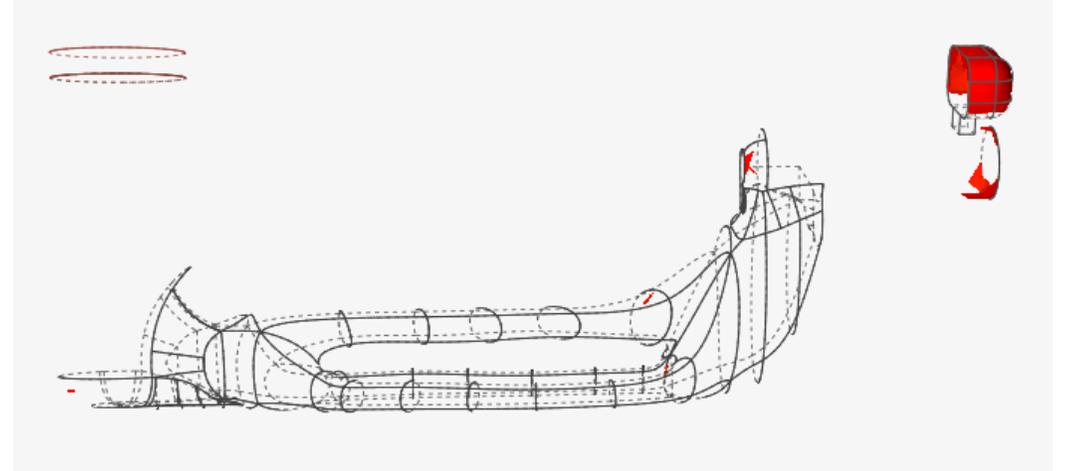
총 수축체적

개선사항

- 공기흐름 부분에서 Turbulent flow가 없음.
- 총 수축체적에서 특이사항 없음. Chiller 불필요.



Last air



Overflow 개선사항

| 개선사항

- Shaft 끝단에 Last air 나타남.
- Overflow를 이용하여 Last air 상당량 감소.



- Frame: 5.2kg
- Shaft: 0.25kg * 2 = 0.5kg
- Chair frame: 1.5kg
- Plastic Panel: 1.4kg
- Arm rest: 0.4kg
- Foot rest: 0.3kg
- Battery: 0.9kg
- Battery Case: 0.3kg

최종 질량: 10.5kg
(개선안 최종 질량: 10.7kg)



- 제조사: 오토복 코리아 헬스케어
- 제품명: B400KV
- 차체 무게: 100kg
- 최고속도: 9km/h

일반 전동 휠체어에 비하여 89.5% 질량 감소
개선안의 경우: 89.3%



- 제조사: 아트원
- 제품명: 조이 라이더
- 차체 무게: 23kg
- 최고속도: 6km/h

기존 경량 전동 휠체어에 비하여 54.3% 질량 감소
개선안의 경우: 53.5%

Final Result and Comparison



감사합니다

리벳이음 강도: <https://mechanicalinfo.wordpress.com/tag/riveted-joint-failures/>

미터나사 규격: <https://wkdghfl.tistory.com/69>

플라스틱 물성치: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=a882a1c603374e278d062f106dfda95b&ckck=1>

플라스틱 물성치: <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>

<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=a882a1c603374e278d062f106dfda95b>

척추 치수: <https://m.blog.naver.com/PostView.nhn?blogId=gig515&logNo=220056332743&proxyReferer=https:%2F%2F>

장애인 경사로 경사각: <https://blog.naver.com/hjstyle3535/220562130459>

인체 수치: 휠체어의 인체측정학적 평가 및 디자인 논문, 한국생산기술 연구원 실버 기술개발 사업단

착석자세에 따른 하중: 착석자세 모니터링 시스템 개발을 위한 착석 자세 추정 연구 논문, 대한기계학회

모터 속도 및 RPM 이론: <http://craig.backfire.ca/pages/autos/horsepower>

휠체어 쿠션 논문: Technical consideration in seat cushion selection by Martin W. Ferguson-Pell