

전기 상용 차량의 하부 프레임 구조 최적 설계

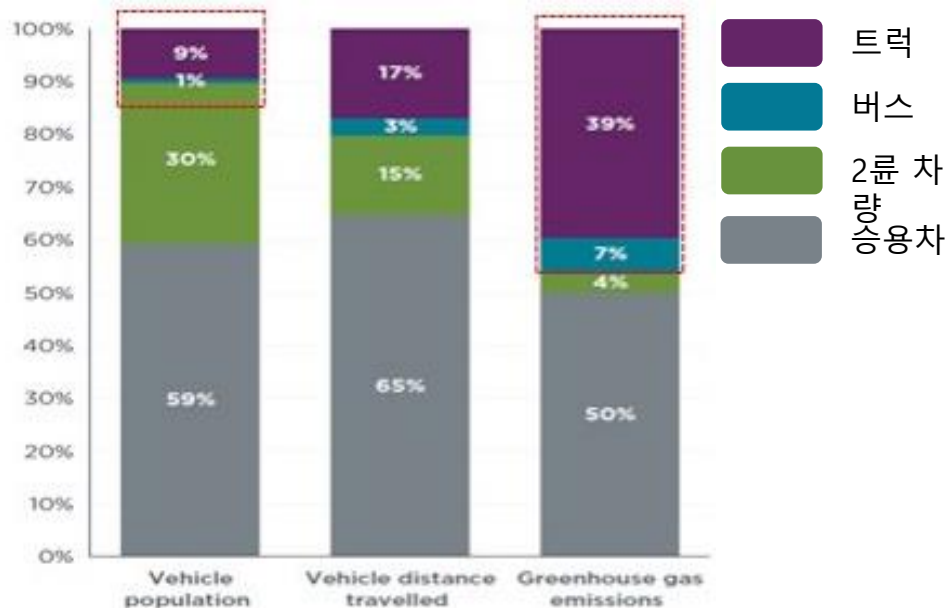
차량최적설계 3조

2017036917 강영재
2017037129 오은솔
2017037301 천금환

01. 연구 배경

전기 트럭의 발

전
<전세계 차량별 점유율 및 온실 가스 배출 현



*출처: ICCT(2017), Transitioning to zero-emission heavy-duty freight vehicles

트럭은 적은 대수 비중으로, 높은 CO2 배출량을 보이고 있음

→ 기술 발전과 함께, 트럭의 전동화가 시급하게 이루어져야함

- 전기 트럭 동향

더구루

글로벌 전기트럭 시장 미래 동향...2030년 10억대 돌파 전망

29일 토마스 인사이트(Thomas Insights)에 따르면 글로벌 전기트럭 시장은 오는 2030년까지 연평균성장률(CAGR) 26%를 나타내며 향후 7년간 시장 규모가...

2023. 9. 29.



물류신문

볼보트럭, '전기트럭 기술 세미나' 개최 <육상철도 < 기사본문

볼보트럭코리아(대표 박강석)는 지난 10일부터 이를 동안 한국소방산업기술원 소방장비센터에서 '전기트럭 기술 세미나'를 개최했다고 밝혔다.

2023. 10. 13.



- 기업의 전기 트럭

Tesla - Semi



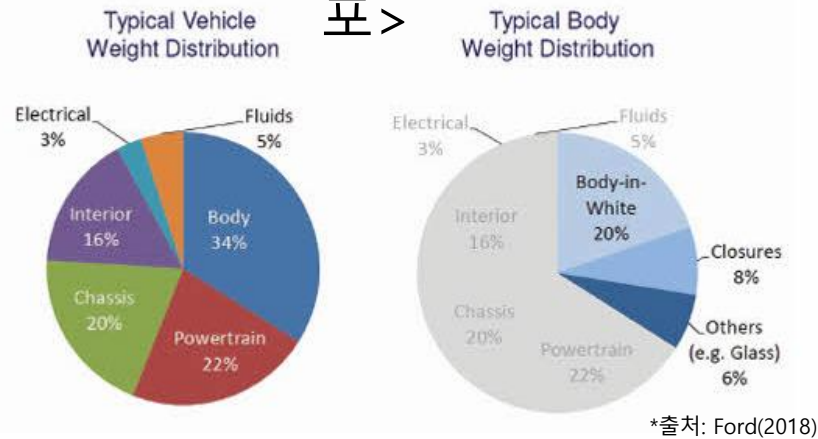
Hyundai - Xcient



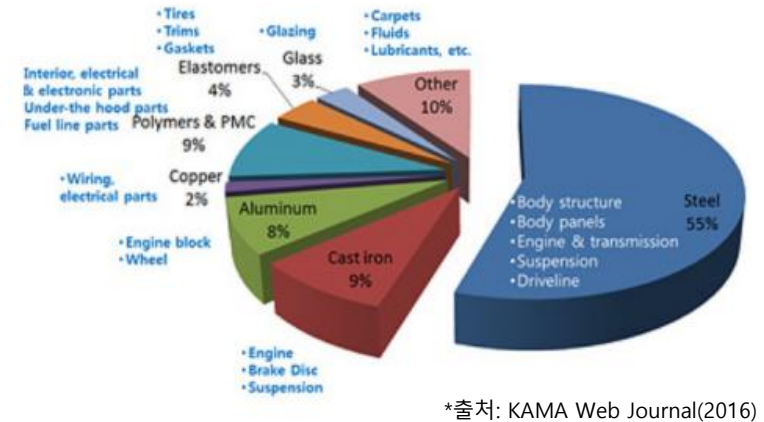
01. 연구 배경

주제 선정

<차량 무게 분포>



<Body 소재 함유량>



상용차 무게를 가장 많이 차지하는 Chassis 경량화가

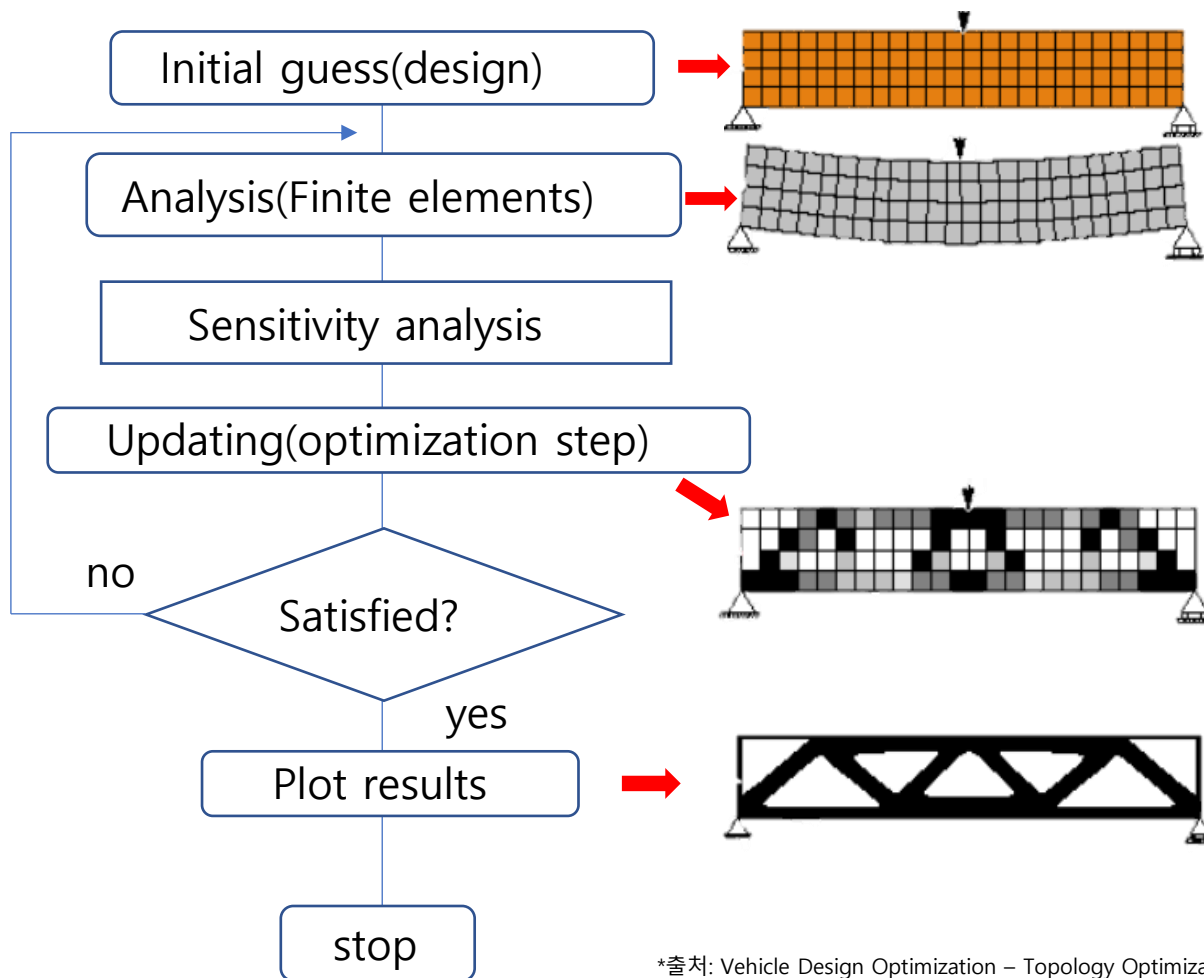
경량화를 위해 알루미늄 및 탄소섬유 소재 함유량을 높이는 추세

하지만 아직 차체에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 강철(steel)

➡ "Chassis 구조를 경량화 하도록 설계해보고, 구성요소는 강철로 선정 하고자함"

01. 연구 배경

Topology Optimization, 새로운 설계 패러다임



“초기 설계 없이도 구조물 최적설계 가능”

개념 설계 단계에서 효과적

선행(Up-Front) CAE에 적합

구조물 경량화에 큰 공헌: 혁신 설계

*출처: Vehicle Design Optimization – Topology Optimization

최적화 문제
구성

목적 함수	컴플라이언스-최소화 (강성 최대화)
구속 조건	부피율
설계 변수	요소 형상 밀도

“Tesla-Semi”



Semi Specs

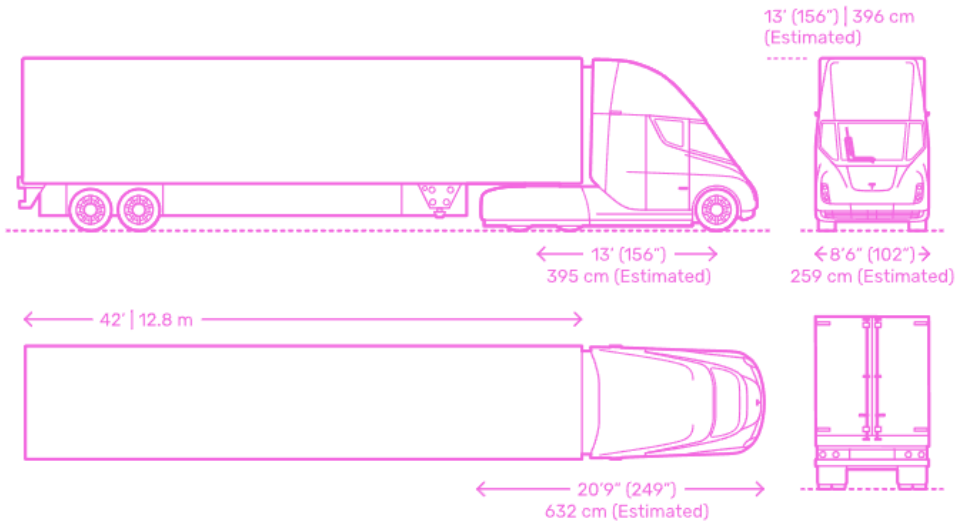
Fully Loaded at 82k lbs Gross Combination Weight

Mile Range Approximately 300 or 500 miles	Energy Consumption Less than 2 kWh per mile
0-60 mph 20 seconds	Fast Charging Up to 70% of range in 30 minutes
Speed Up a 5% Grade Highway speed limit	Fuel Savings (est.) Up to \$200,000 over 3 years
Powertrain 3 independent motors on rear axles	

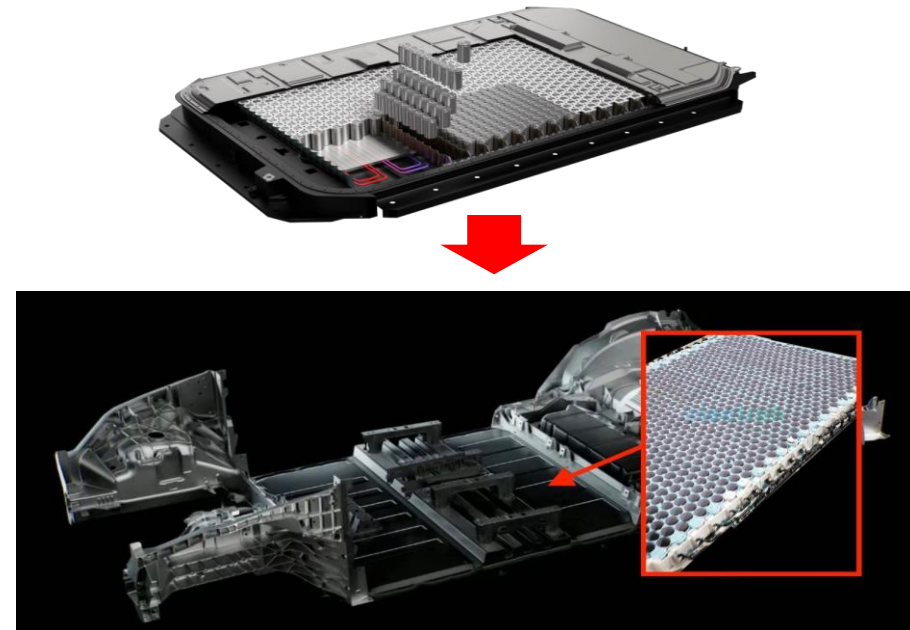
03. 모델 제작

Base 모델

<추정된 수치>



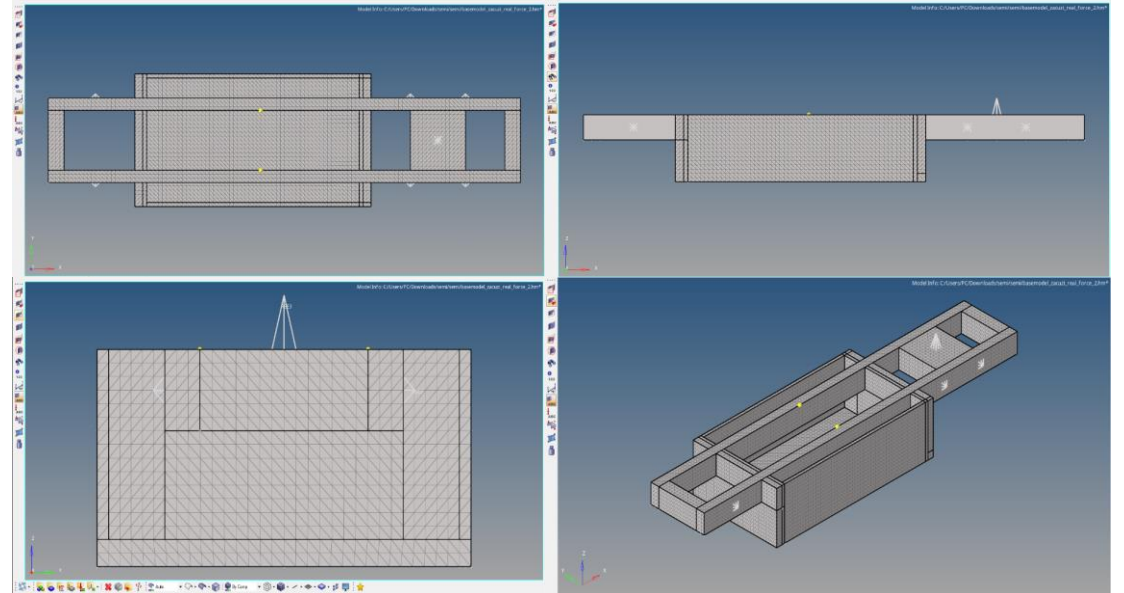
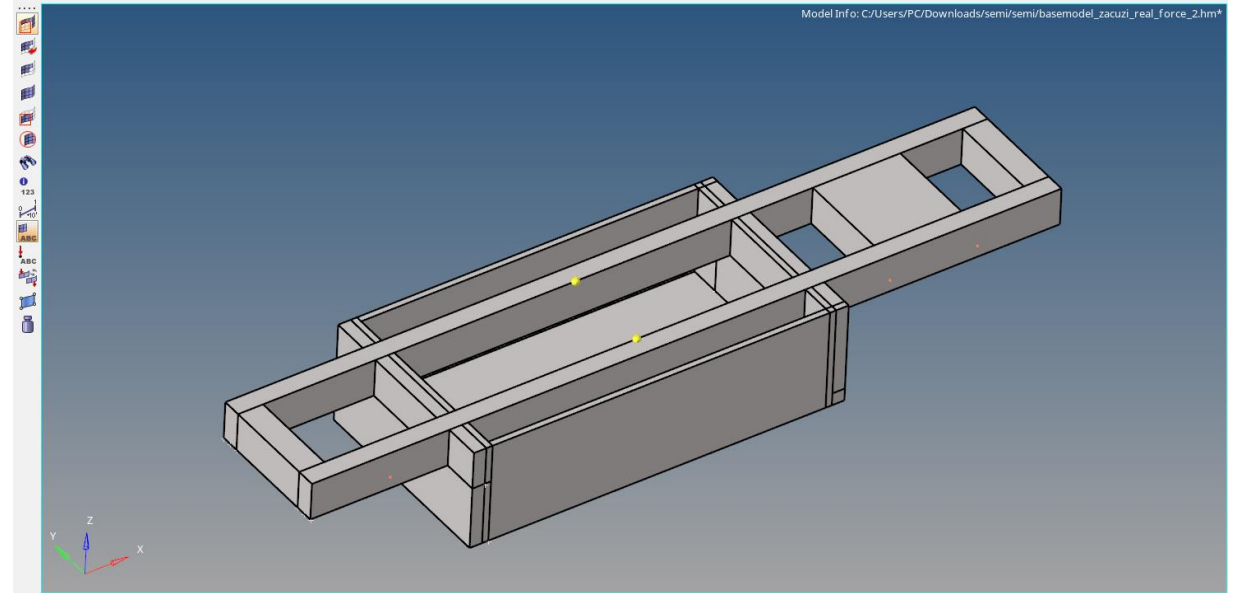
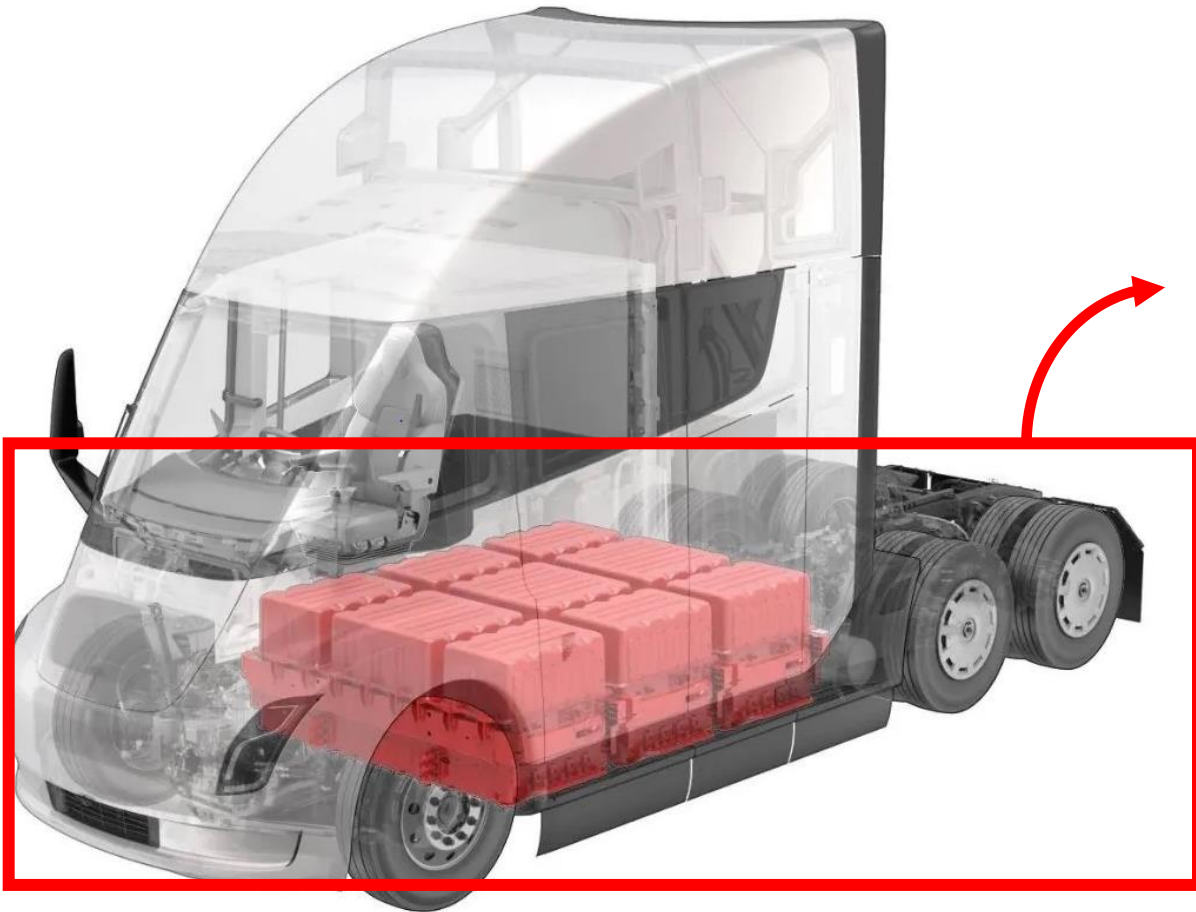
<Cell to body>



정확한 차량 수치가 아직 공개되지 않았기 때문에, 추정된 데이터를 사용하여 모델 수
추가적으로 배터리 팩, 모듈, 셀로 구성된 기존 차량 배터리 구조에서,
최근 테슬라가 발표한, 셀을 새시에 직접적으로 탑재하는 "Cell to body" 구조
반영 시도

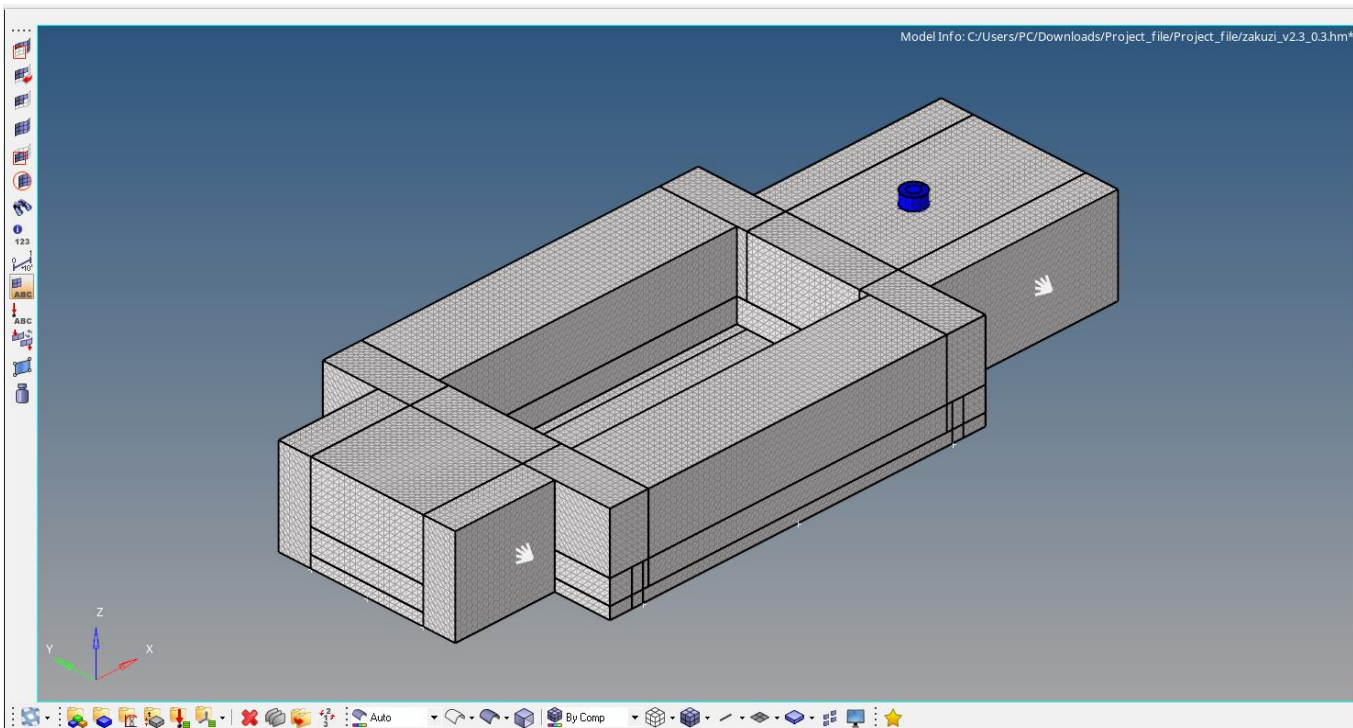
03. 모델 제작

Base 모델



03. 모델 제작

설계 영역



“Topology Optimization Initial guess 단계”

최적화를 위해 기존 빔의 형태가 아닌,
바퀴를 제외한 모든 하부 영역을 설계 영역
으로 설정

- 배터리 탑재 공간 고
- 기본 수치 사항 Base 모델과 동
- 재질 강철로 Base 모델과 동일

04. 연구 과정

물성치 설정

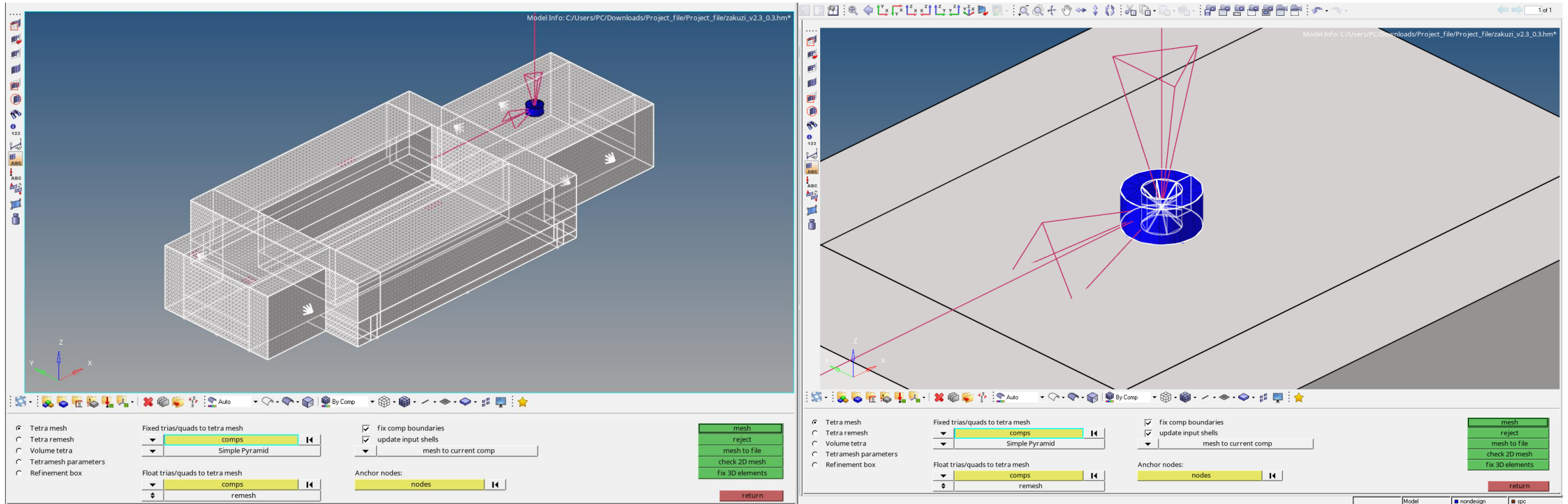
Name	Value
Solver Keyword:	MAT1
Name:	steel
ID:	1
Color:	
Include:	[Main Model]
Defined:	☒
Card Image:	MAT1
User Comments:	Hide In Menu/Export
E:	210000,0
G:	
NU:	0,3
RHO:	7,85e-09
A:	
TREF:	

Name	Value
Solver Keyword:	PSOLID
Name:	property1
ID:	1
Color:	
Include:	[Main Model]
Defined:	☒
Card Image:	PSOLID
Material:	(1) steel
User Comments:	Hide In Menu/Export
CORDM options:	BLANK
ISOP:	
FCTN:	
HOURLS_OPT:	☐
PSOLIDX:	☐

새시 구성 요소 중 가장 많은 비율을 차지하는 강철로 재질 설정
Materials – steel 생성 후, property - PSOLID로 각 구조물에 부여

04. 연구 과정

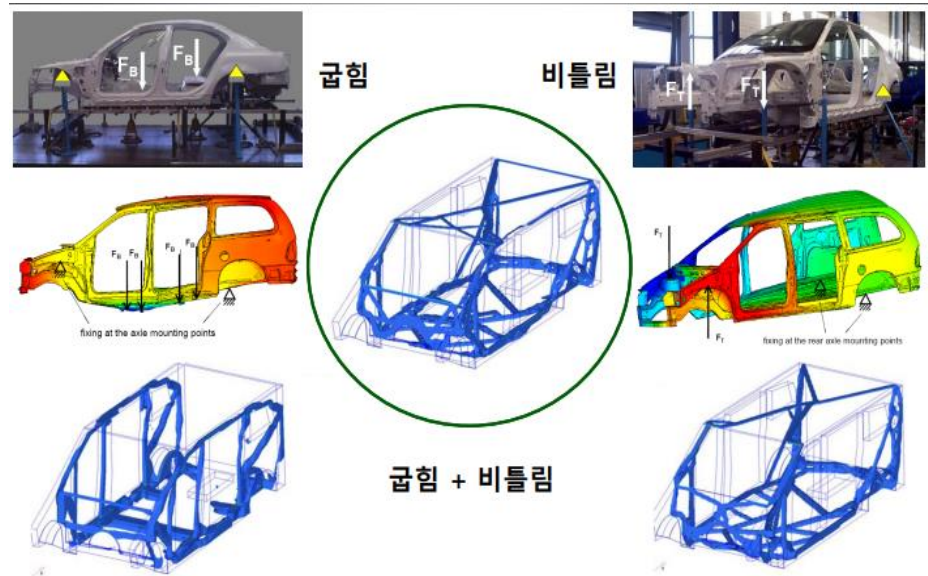
요소망 생성



tetramesh	edit element	Geom
smooth	split	1D
CFD tetramesh	replace	2D
	detach	3D
	order change	Analysis
	config edit	Tool
	elem types	Post

- 3D 형상이므로 Tetra mesh 기능을 사용하여 요소망 생성
- Design 영역과 nondesign 영역 모두 깨지는 형상이 없도록 적절한 크기 선정

해석 상황 설정



*출처: Vehicle Design Optimization – Topology Optimization

Table 2 Classification of automotive body rigidity

차체 상황	구 분	종 류
화이트 바디 (B.I.W.)	전체강성	굽힘 강성 비틀림 강성 개구부 강성
	부분강성	Floor 강성 Roof 인장강성등
실 차	전체강성	굽힘 강성 비틀림 강성
	부분강성	Door 강성 샤시, 외판 인장강성등

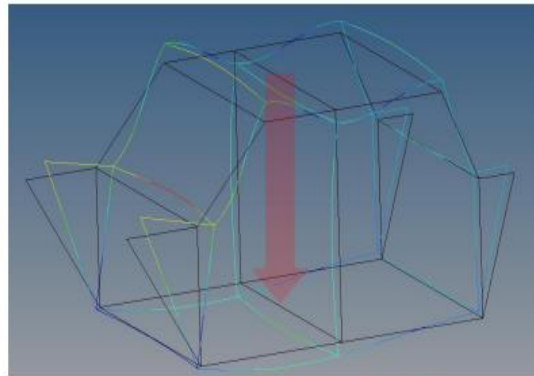
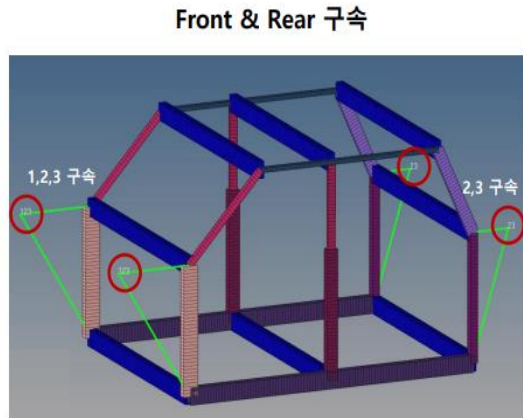
*출처: Analysis for Body Structure Design of Vehicle – Concept Design

“차량 바디와 새시는 굽힘 하중과 비틀림 하중에 대하여 강성을 유지하도록 설계”

실습 과정에 진행했던 2D 구조의 하중 조건에 따른 컴플라이언스 최소화 예제를 참고하여 3D 새시 구조에 하중 조건을 고려하고자 함

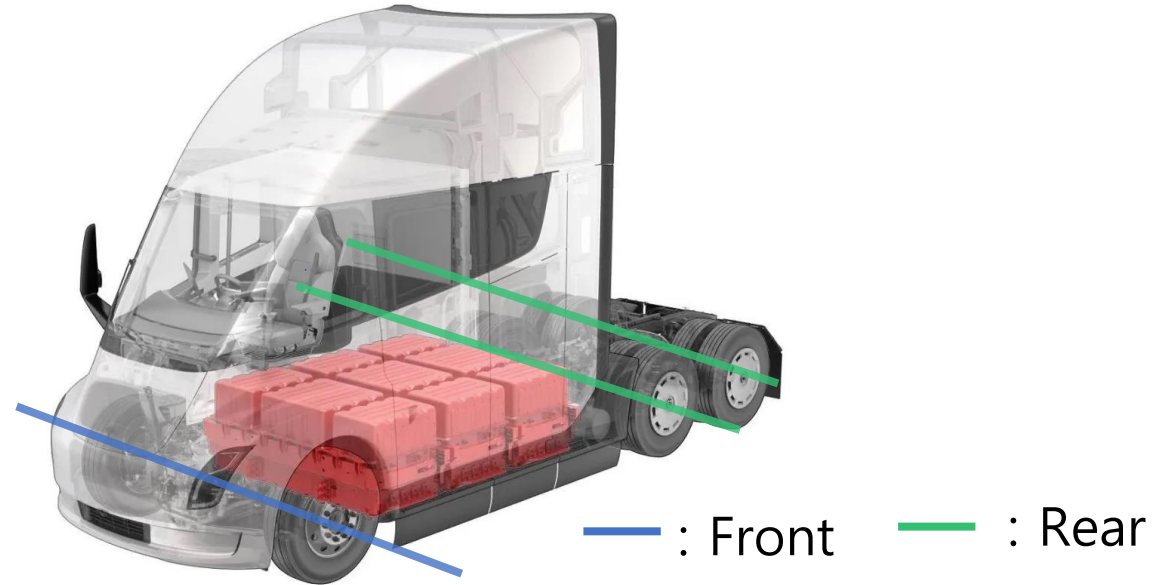
04. 연구 과정

구속 조건 설정



Mode 13(70.04 Hz): Bending

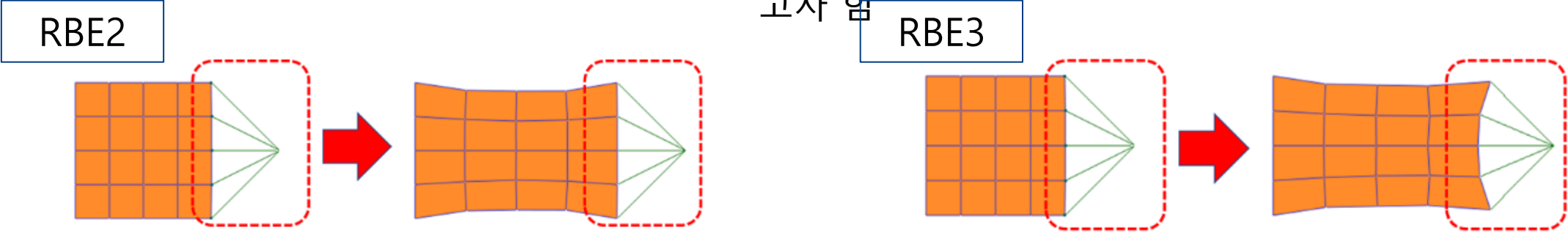
*출처: Vehicle Design Optimization – Body Torsion Analysis and Optimization



트럭의 바퀴 축을 고려하여 Front 1축과 Rear 2축으로 선정
실습 자료를 참고하여, Front 축은 1,2,3 dof, Rear축은 2,3 dof구속

구속 조건 설정

바퀴 연결 축에 힘이 가해지는, 움직이는 강체를 구속해야 하므로 RBE요소를 적용하여 구속하고자 함



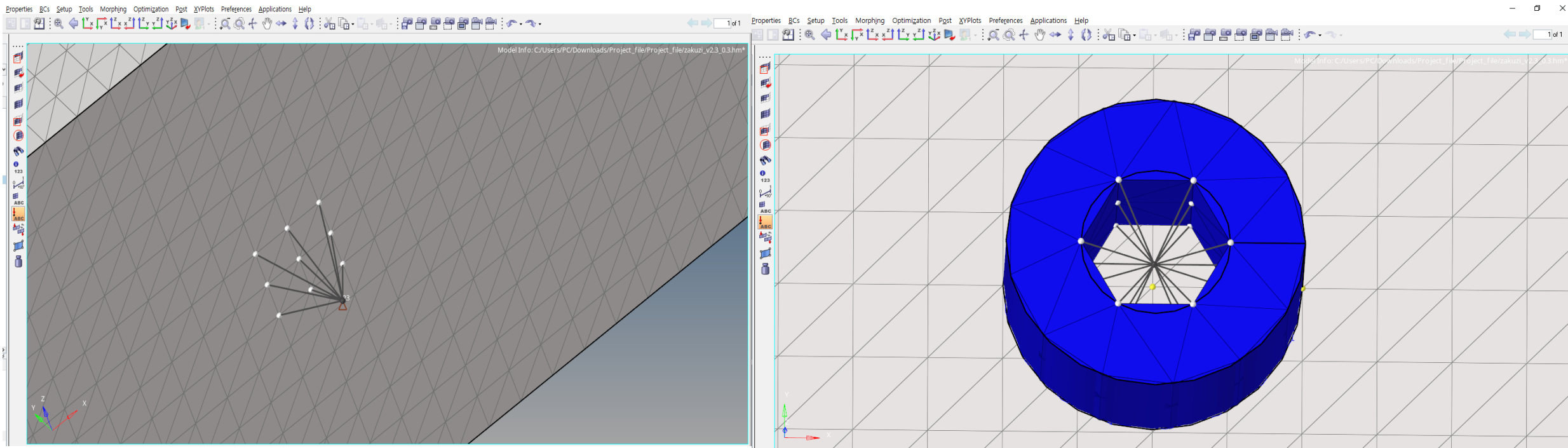
<RBE3(Interpolation Element)의 장점>

- slave로 지정된 node들의 위치와 자세 변경 가능
- master node의 상대 위치 변경 가능
- slave node에 힘을 골고루 분포

masses	bars	connectors	line mesh	edit element	☐ Geom
joints	rods	spotweld	linear 1d	split	☒ 1D
markers	rigids	HyperBeam		replace	☐ 2D
	rbe3			detach	☐ 3D
	springs			order change	☐ Analysis
	gaps		vectors	config edit	☐ Tool
			systems	elem types	☐ Post

04. 연구 과정

구속 조건 설정



Model Info: C:/Users/PC/Downloads/Project_file/Project_file/zakuzi_v2.3_0.3.hm*

Model Info: C:/Users/PC/Downloads/Project_file/Project_file/zakuzi_v2.3_0.3.hm*

create dependent: calculate node independent: nodes

dependent dofs: ☒ dof1 ☐ dof4 ☒ dof2 ☐ dof5 ☒ dof3 ☐ dof6

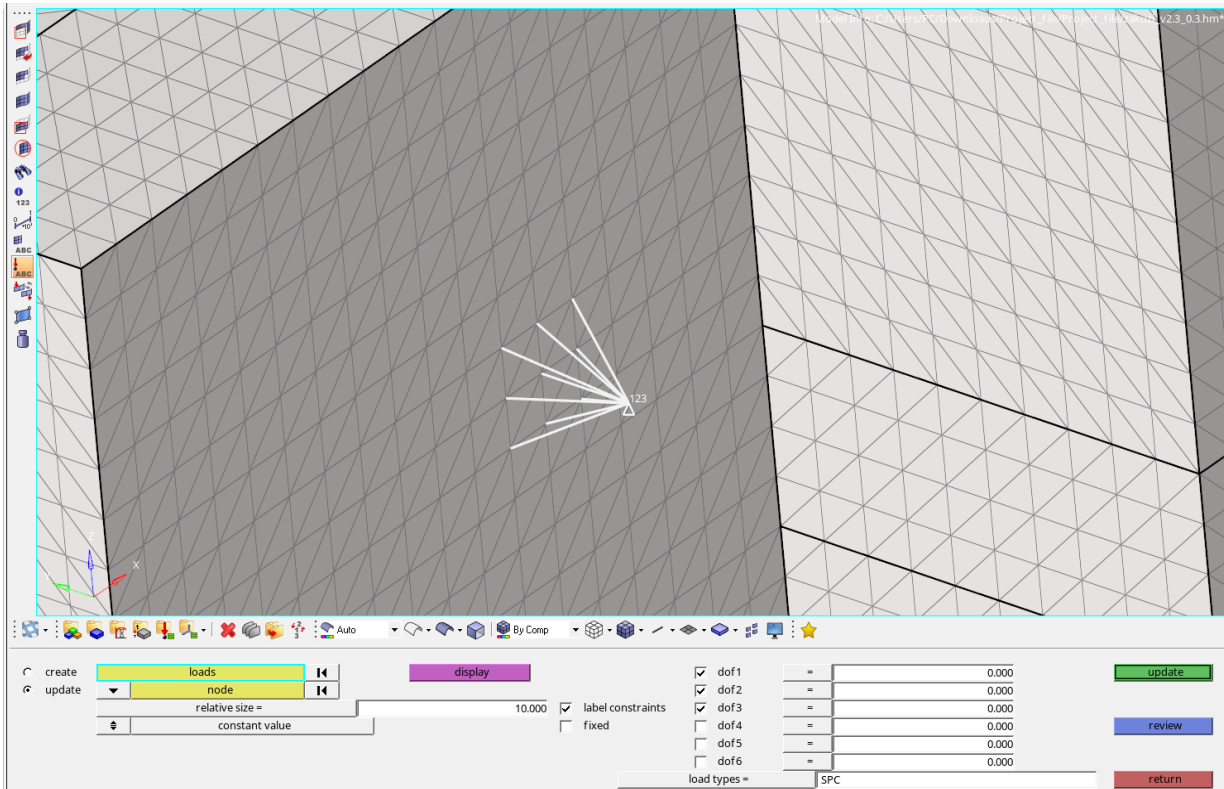
weight = 1.000

elem types = RBE3

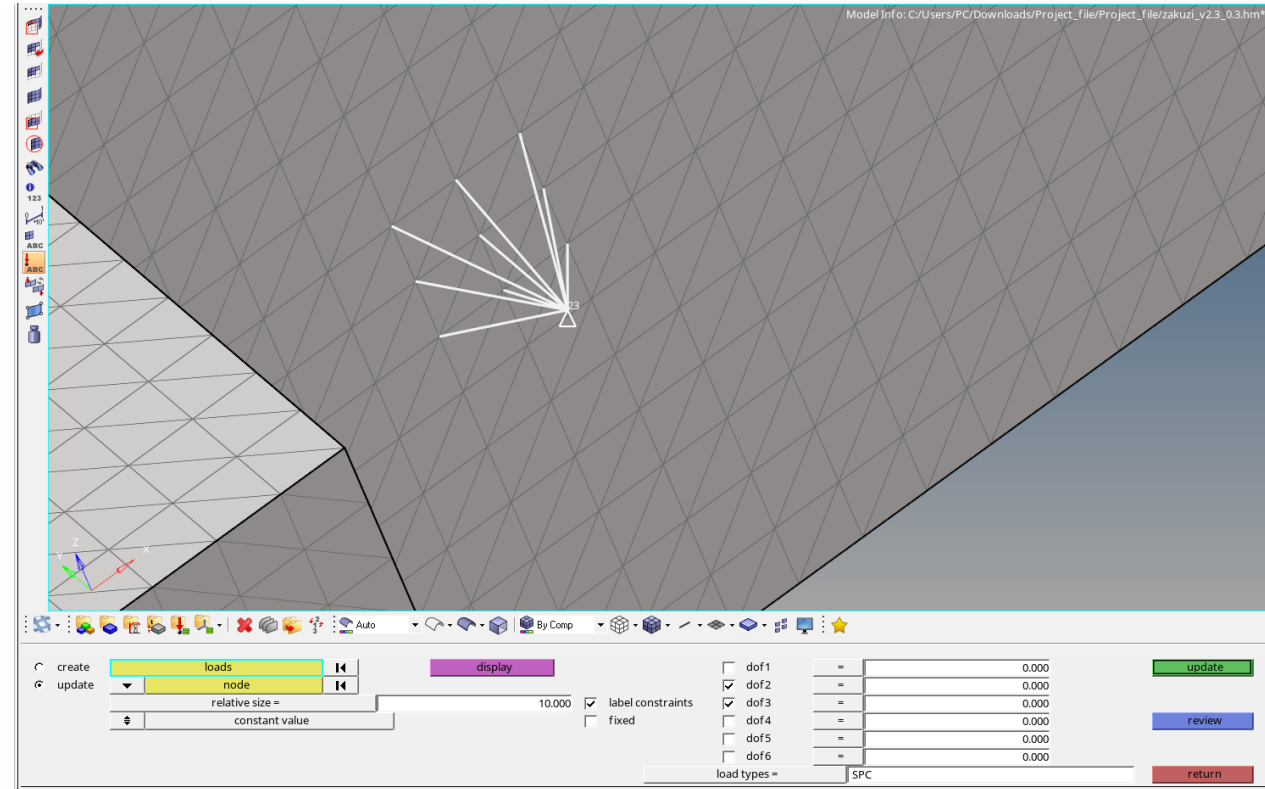
create reject review return

04. 연구 과정

구속 조건 설정



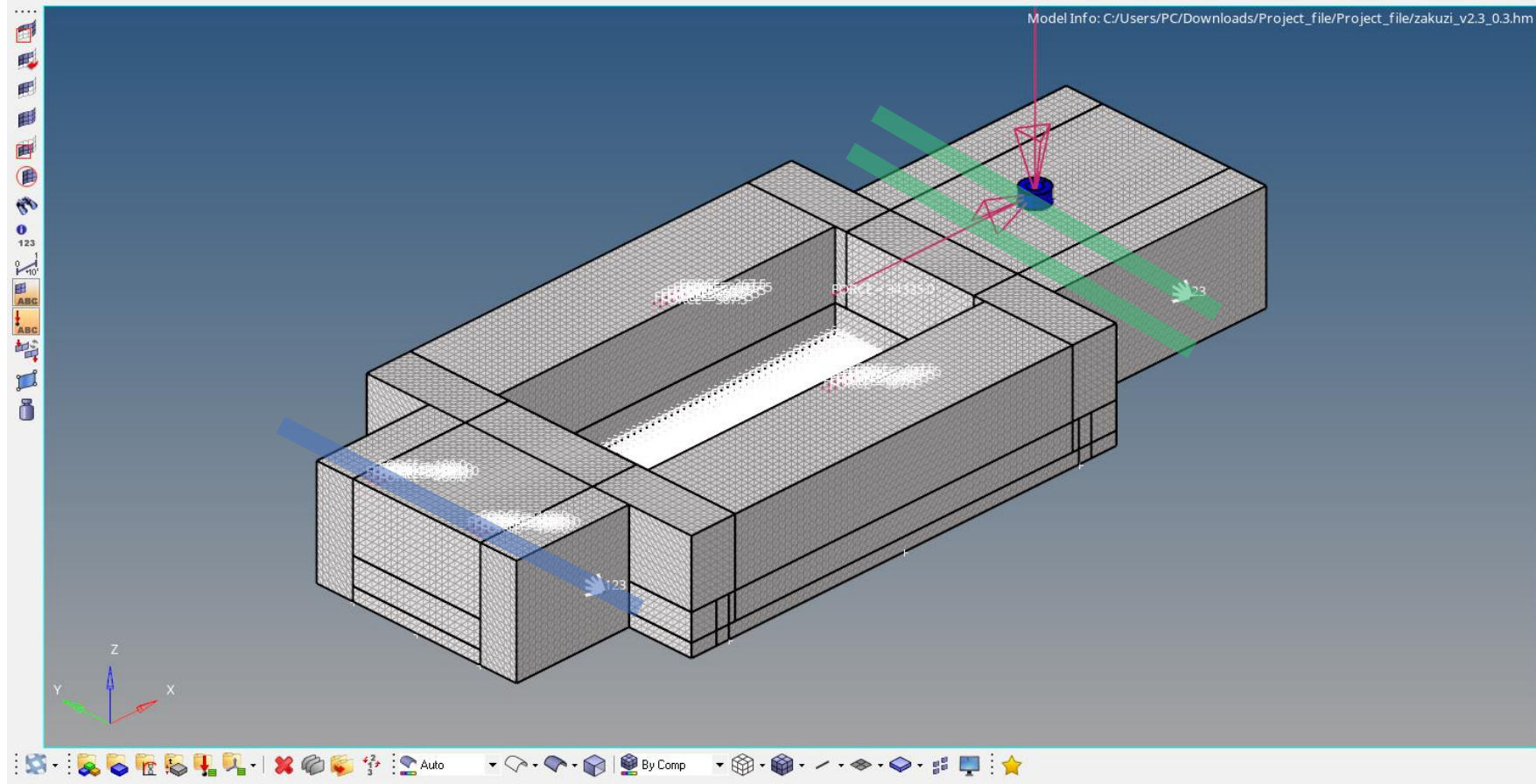
<Front 축>
1,2,3 dof 구속



<Rear 축>
2,3 dof 구속

04. 연구 과정

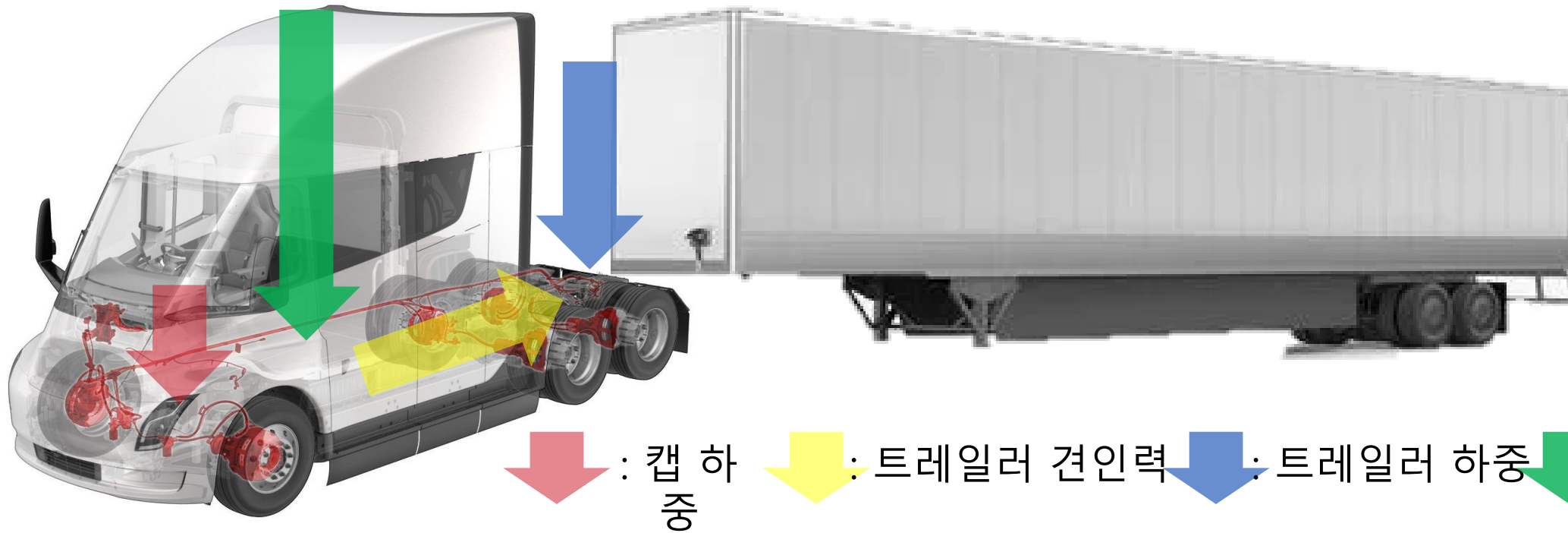
구속 조건 설정



- Front 축 1개, Rear 축 2개 구속

04. 연구 과정

하중 조건 설정



트럭에 작용하는 하중을 캡 하중과 배터리, 트레일러 하중으로 나누어 설정
상용차라는 특수성에 일반적으로 고려되는 제원을 참고하여 트레일러 견인력도 고려하도록 설정

04. 연구 과정

하중 조건 설정 : 캡 하중 : 배터리 하중



TESLA Model S의 배터리 제원인 무게 537kg, 186wh/kg 을 통해 Semi의 배터리 무게 도출
Semi는 850kWh의 배터리 용량을 가지므로, 4570kg 약 4.5t의 무게를 가진다고 가정



Semi는 Class 8 heavy-duty truck으로 분류, 같은 등급의 일반적인 차량 무게는 17,000lbs(7.7t)
전기 상용차는 배터리 무게를 고려하여 약 10~11t의 무게를 가진다고 추정
이에, 배터리 무게와 파워트레인 무게를 제외하고 캡은 약 1.5t의 무게를 가진다고 가정

04. 연구 과정

하중 조건 설정

 : 트레일러 하중

<테슬라 트레일러 견인 가이드>

휠/림 크기	승객 수	최대 연결하중	최대 수직하중
19", 20" 및 21"	최대 3명	1,588kg(3,500lbs)	159kg(350lbs)
19" 및 21"	4~5	1,588kg(3,500lbs)	159kg(350lbs)
20"	4~5	1,043kg(2,300lbs)**	104kg(230lbs)**
19"	6~7인치	907kg(2000lbs)**	91kg(200lbs)**
20"	6~7인치	견인할 수 없음	-
21"	6~7인치	544kg(1200lbs)**	54kg(120lbs)**

*출처: TESLA Model Y Manual

TESLA 트레일러 견인 가이드를 통해 최대 수직 하중은 최대 연결 하중의 약 10%로 제한하는
것을 확인
TESLA Semi의 최대 적재 중량의 10%로 트레일러 하중 설정

04. 연구 과정

하중 조건 설정 : 트레일러 견인력

<구름 저항 계수>

ROLLING RESISTANCE PERCENTAGE TABLE				
Underfoot Description	Tires (bias)	Tires (radial)	Track	Track & Tires
SURFACE A - Hard, smooth surface - Concrete, cold asphalt or dirt - No penetration or flexing	1.5%	1.2%	0.0%	1.0%
SURFACE B - Firm, smooth, rolling - Flexing slightly under load - Maintained, watered	3.0%	2.5%	0.0%	1.8%
SURFACE C - Dirt, rutted - flexing under load - Little maintenance, no water 1" (25mm) penetration or flexing	4.0%	4.0%	0.0%	2.4%

$C_{rr} = 0.01$

-트레일러의 주행 저항

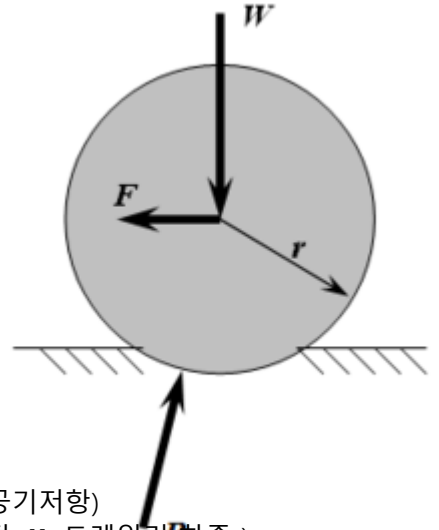
$$R_{rolling} = C_{rr} * N$$

$$R_{inertia} = m * a$$

$$R_{inclination} = W * \sin\theta$$

$$R_{air} = 0.5 * v^2 * C_d * A_f$$

($R_{rolling}$: 구름저항, $R_{inertia}$: 관성저항, $R_{inclination}$: 등판저항, R_{air} : 공기저항)
(C_{rr} :구름저항계수, v : 공기상대속도, C_d : 공기저항계수, A_f : 전면 투영 면적, N : 트레일러 하중)



상용차의 성능 제원에서 견인력을 표시하지만, Tesla - Semi 데이터는 공개되지 않음

주행 저항을 고려하여 이상적인 상황에서의 견인력을 도출하고자 함

<두산 B25SE-7 모델 제원>



구분	성능	구분	성능	구분	성능
24	작업속도	중형: 부하/무부하	km/h	18/18	18/18
25		상승: 부하/무부하	mm/s	380/520	350/520
26		하강: 부하/무부하	mm/s	500/460	500/460
28	최대 견인력	부하(5분용)	kgf	1620	1590
30	동반능력	부하(5분용)	%	28	24

*출처: 두산 중공업

- 수평 도로로 가정($\theta = 0$)

- 공기저항 무시하라고 가정

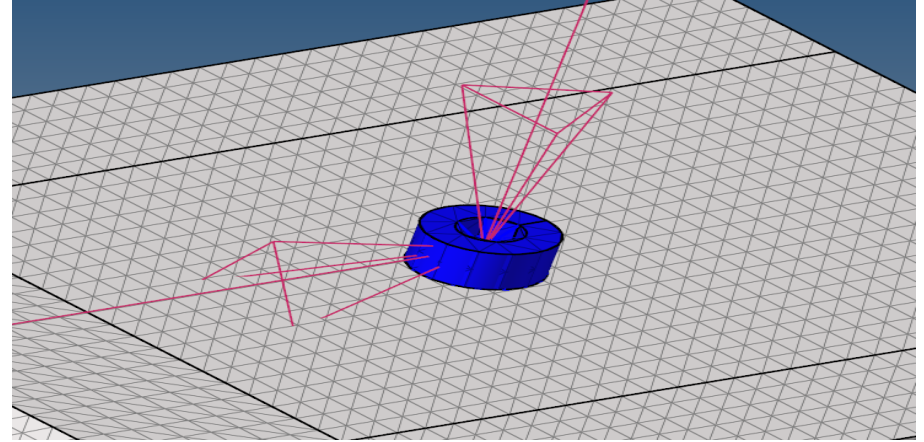
-최대 적재량으로 10초에 5km/h의 주행속도 도달 가정
($a = 0.139m/s^2$)

$$F_{tractive} = R_{rolling} + R_{inertia} + R_{inclination} + R_{air}$$

$$\triangleq 0.15 * N$$

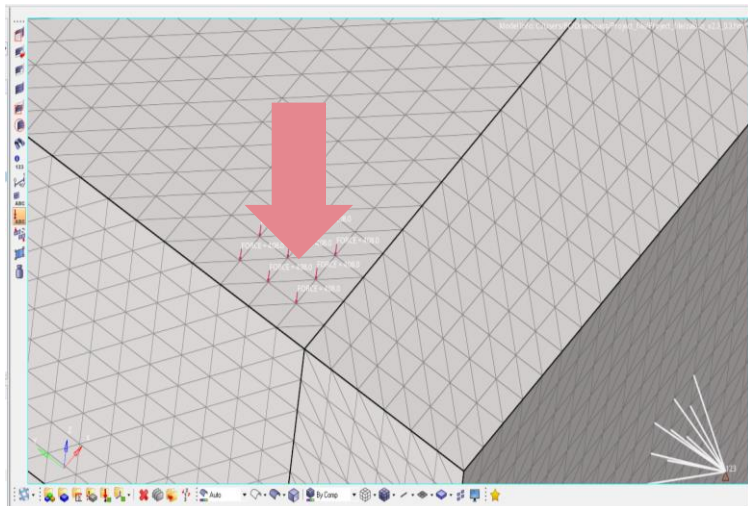
04. 연구 과정

하중 조건 설정

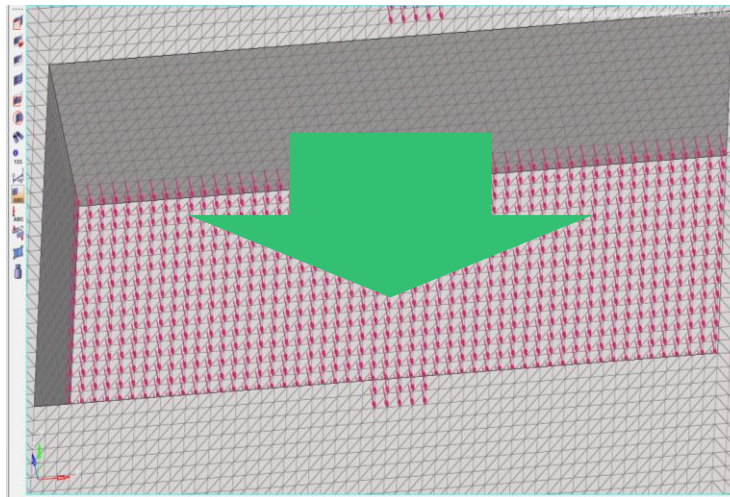


견인력을 고려해 주기 위해, 커플러를 nondesign 영역으로 별도 설계

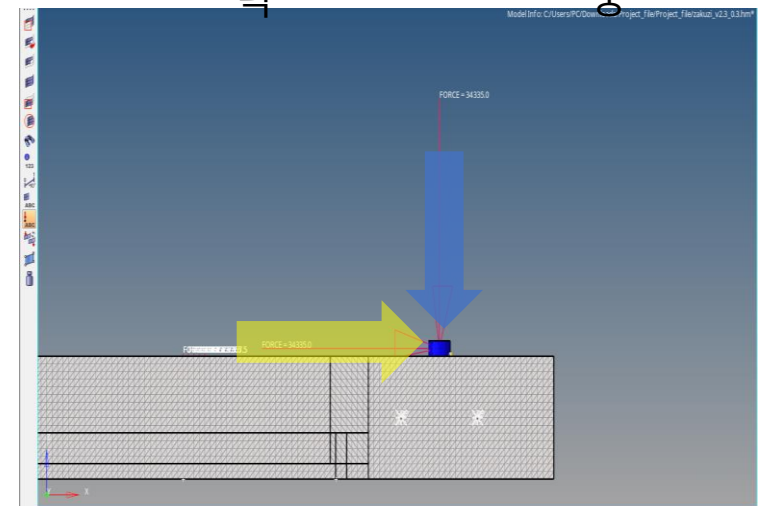
↓ : 캡 하중



↓ : 배터리 하중

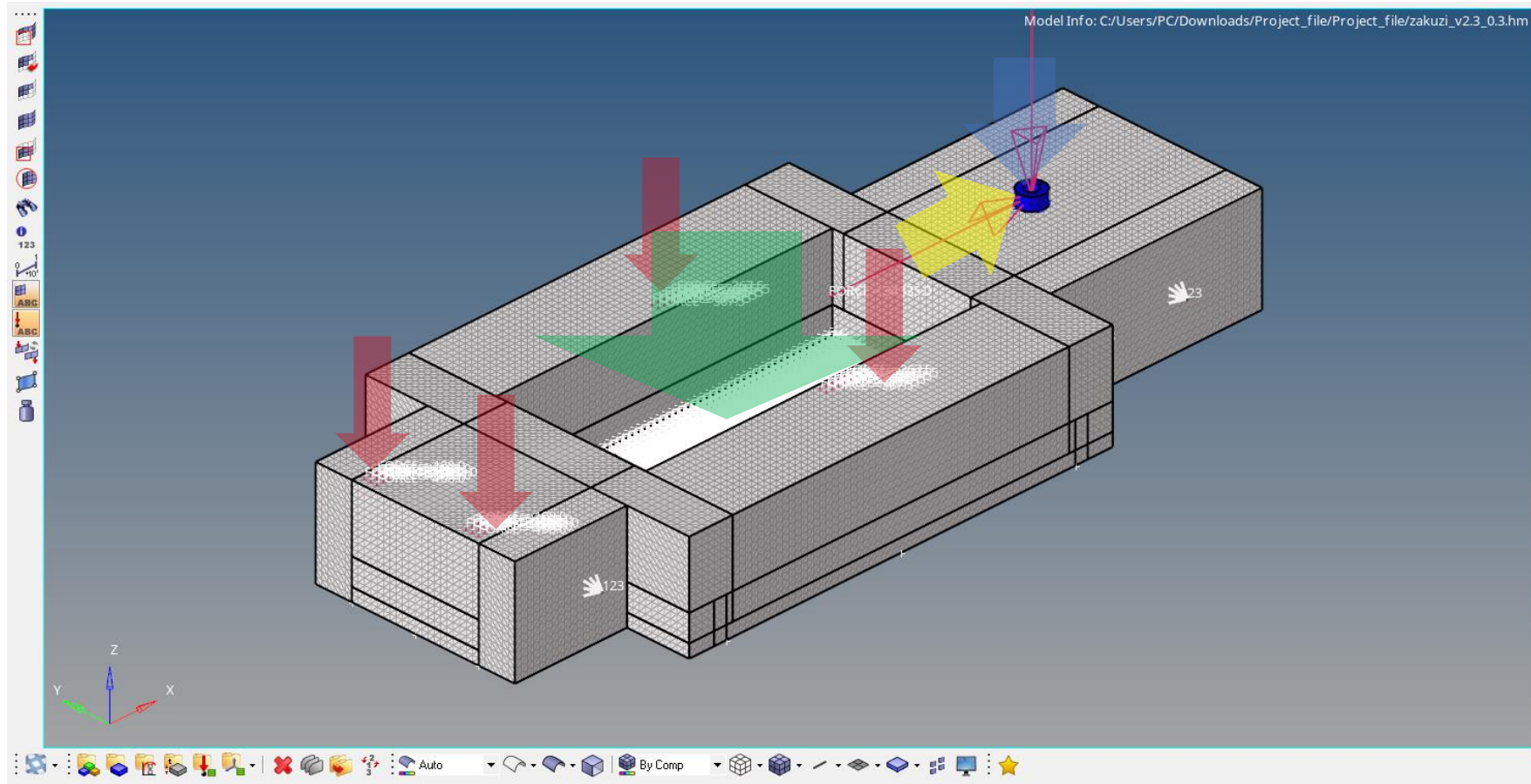


↓ : 트레일러 견인력 ↓ : 트레일러 하중



04. 연구 과정

하중 조건 설정

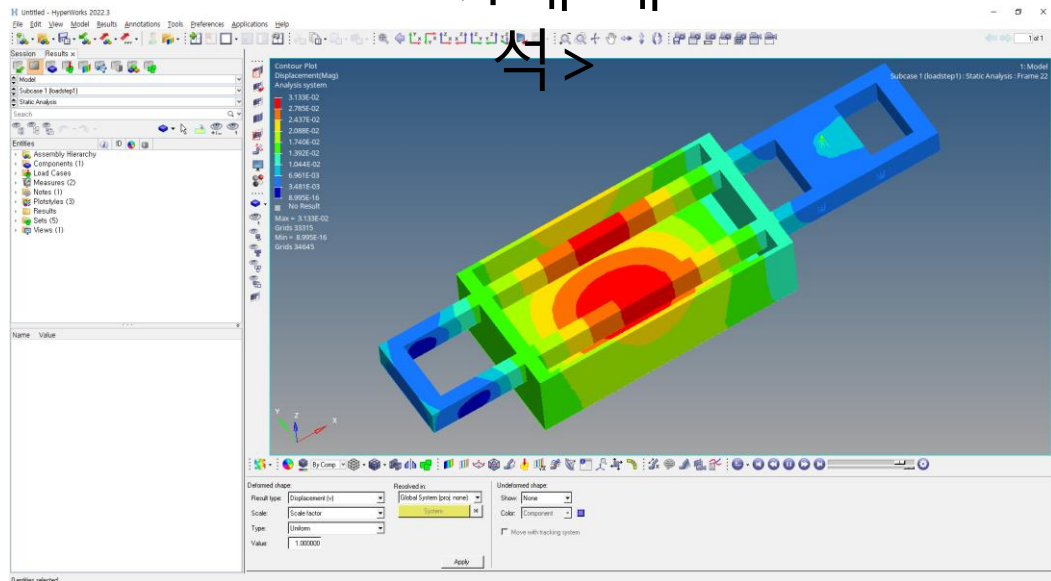


- 각 하중은 가해지는 node 개수에 따라 나누어서 부여
- 캡 하중의 경우 A,B Pillar에 나누어서 부여

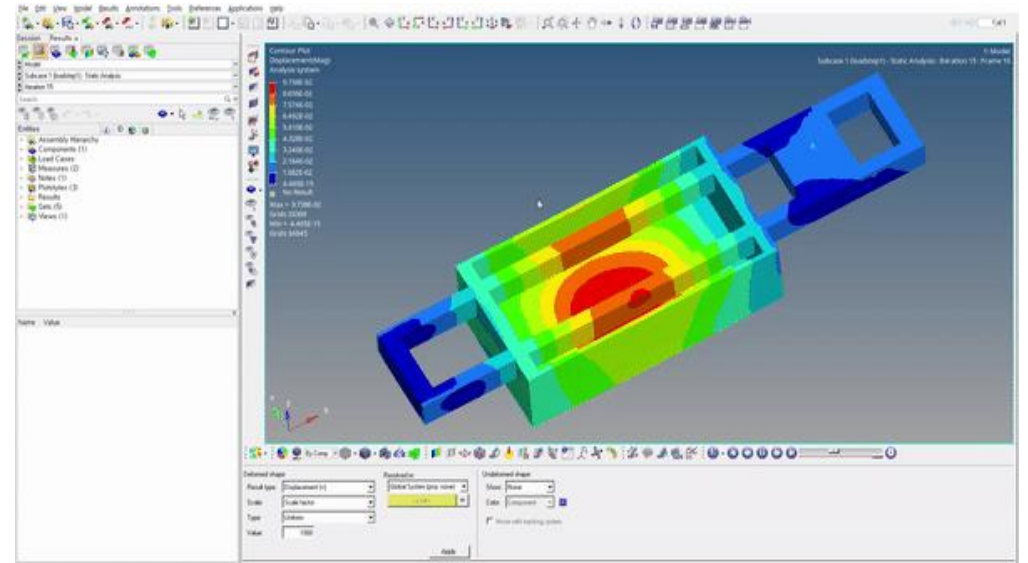
04. 연구 과정

해석 조건 점검

<1배 해석>



<1000배 해석>



Topology Optimization에 앞서, 동일 조건을 Base 모델에 적용하여 해석 조건 점검

하중 및 구속 조건들이 시뮬레이션을 진행하기에 타당한 값 임을 확인

04. 연구 과정

해석 조건 설정(목적 함수)

“컴플라이언스-최소화(강성 최대화)”

하중을 견디는 새시 구조 설계가 목표이므로, 외부 하중에 대한 변형률인
컴플라이언스를 함수로 설정하고, 최소화를 목표로 함
(Analysis – optimization)

topology	size(parameter)	responses	table entries	opti control
topography	gauge	dconstraints	dequations	constr screen
free size	desvar link	obj reference	discrete dvs	lattice params
free shape		objective		
	shape			
composite shuffle	perturbations			
composite size	HyperMorph			

[return](#)

response =

response type

weighted comp

loadsteps

⏮

create

update

review

▼

min

response =

create

update

review

04. 연구 과정

해석 조건 설정(부피율)

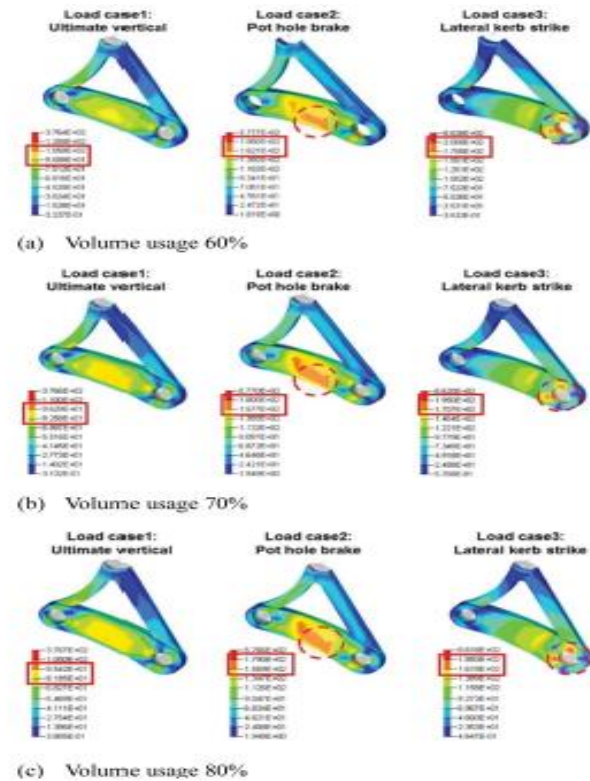


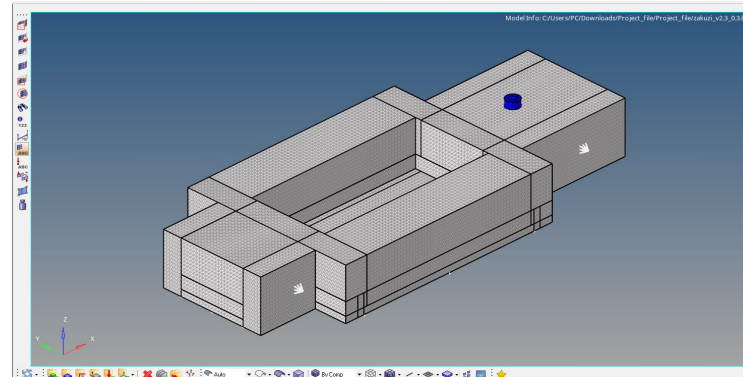
Fig. 10 Equivalent stress contours for the three load cases

부피 제한 조건 60% 달성시 최대 91.2 kg의 경량화를 기대할 수 있다. 위상최적설계를 위해서 상용 프로그램인 Optistruct를 이용하였다.

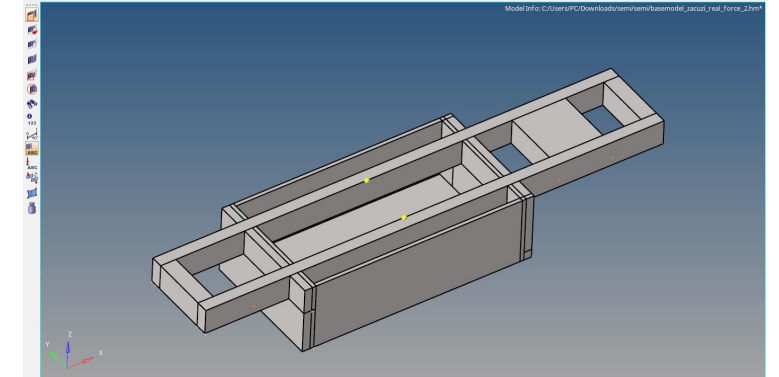
위상최적설계의 축하 과정을 통해 도출되며 최적해는 Fig. 8과

*출처: Lightweight Design of the Stub Axle Using Topology Optimization – Jinsu Kim

설계 영역



Base 모델



당 논문 및 여러 위상 최적화 논문을 참고하여 부피율 설정 방식을 고민하고자
실험적인 방법 또는 허용 가능한 체적 계산을 통해 부피율 설정에 어려움



Base 모델과 설계 영역의 비율을 통해 부피율을 추정하고
경량화를 위해 부피율을 감소시켰을 때의 변화를 확인하고자 함

04. 연구 과정

해석 조건 설정(부피율)

설계 영역

Total # of topology design elements : 205130
Total # of topology cards : 1

Total Volume of Design Material : 8.1320E+09
Total Mass of Design Material : 6.3836E+01
Volume of Non-Design Material : 2.3710E+06
Mass of Non-Design Material : 1.8612E-02

Solid Design Elements : PSOLID

1



Base 모델

Total # of topology design elements : 81060
Total # of topology cards : 1

Total Volume of Design Material : 3.4967E+09
Total Mass of Design Material : 2.6739E+01
Volume of Non-Design Material : 0.0000E+00
Mass of Non-Design Material : 0.0000E+00

Solid Design Elements : PSOLID

1

해석 후 out 파일을 통해 Base 모델이 설계 영역의 약 **43%**의 부피임을 확인

04. 연구 과정

해석 조건 설정(부피율)

topology	size(parameter)	responses	table entries	opti control
topography	gauge	dconstraints	dequations	constr screen
free size	desvar link	obj reference	discrete dvs	lattice params
free shape		objective		
	shape			
composite shuffle	perturbations			
composite size	HyperMorph			

return

response = volfrac

response type

weighted comp

by entity

props

no regionid

create

update

review

constraint =

lower bound = -1.000e+20

upper bound = 0.300

response = volfrac

create

update

review

경량화를 위해 0.3을 최대 부피율로 설정

04. 연구 과정

해석 조건 설정

The image displays four screenshots of the ANSYS Workbench interface, showing the setup of analysis conditions for a finite element model. The screenshots are arranged in a 2x2 grid, each showing a different analysis type selected in the 'Main Model' tree.

Top Left Screenshot (DESOBJ(MIN)): The 'Main Model' tree shows the 'objective' node selected. The 'Properties' panel shows the 'Solver Keyword' as 'DESOBJ(MIN)'. The 'Metadata' panel shows the 'Response Id' as '(2) Wcomp'.

Top Right Screenshot (DOPTPRM): The 'Main Model' tree shows the 'optistruct_optcontrol' node selected. The 'Properties' panel shows the 'Solver Keyword' as 'DOPTPRM'. The 'Metadata' panel shows the 'Response Id' as '(2) Wcomp'.

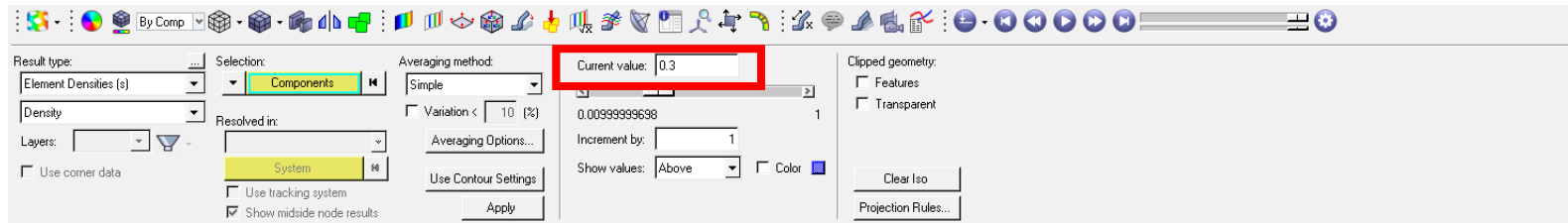
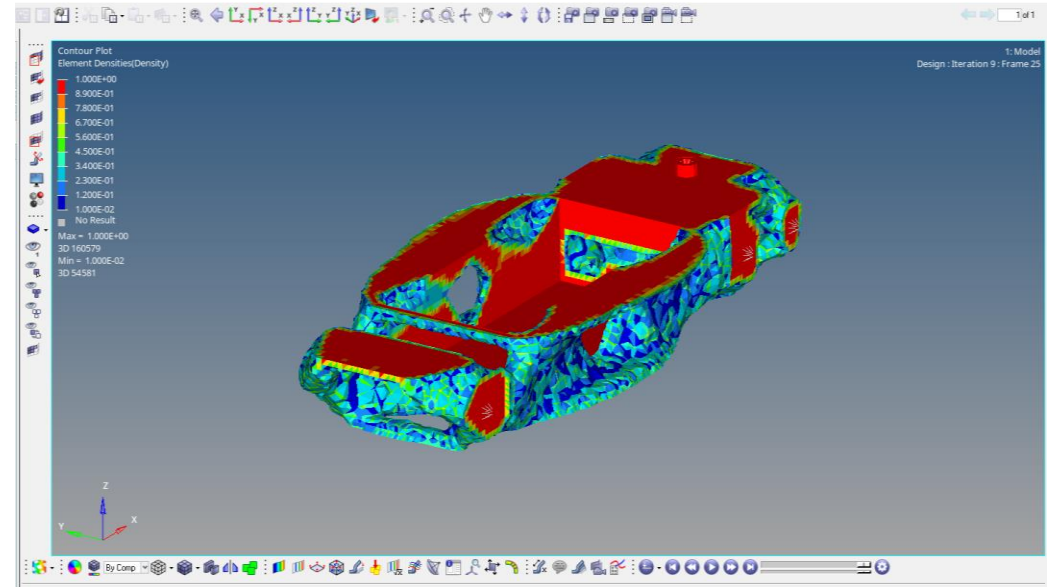
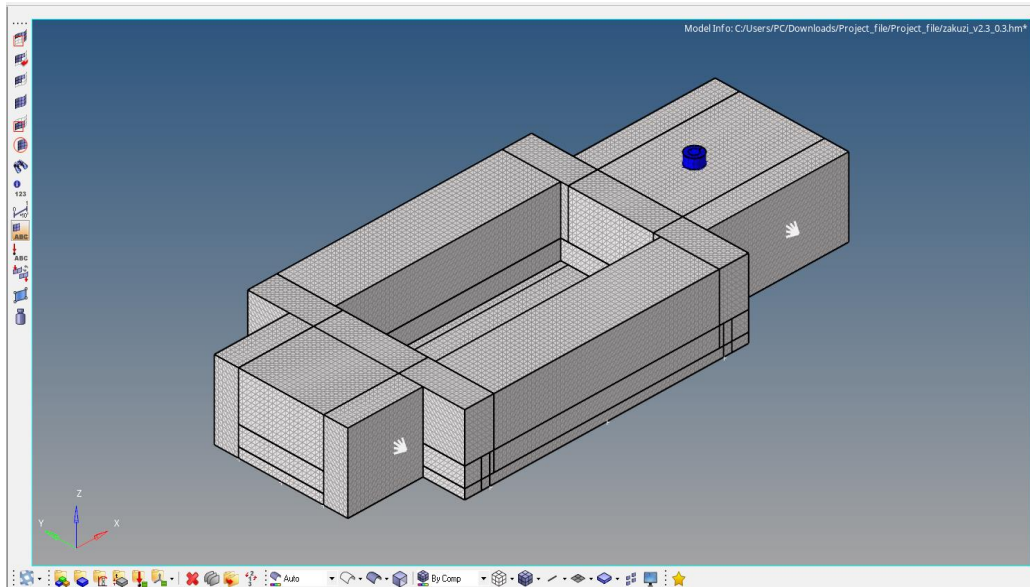
Bottom Left Screenshot (DRESP1): The 'Main Model' tree shows the 'volfrac' node selected. The 'Properties' panel shows the 'Solver Keyword' as 'DRESP1'. The 'Metadata' panel shows the 'Response Id' as '1'.

Bottom Right Screenshot (DRESP1): The 'Main Model' tree shows the 'Wcomp' node selected. The 'Properties' panel shows the 'Solver Keyword' as 'DRESP1'. The 'Metadata' panel shows the 'Response Id' as '2'.

해석 조건이 모두 잘 설정되었는지 점검

05. 연구 결과

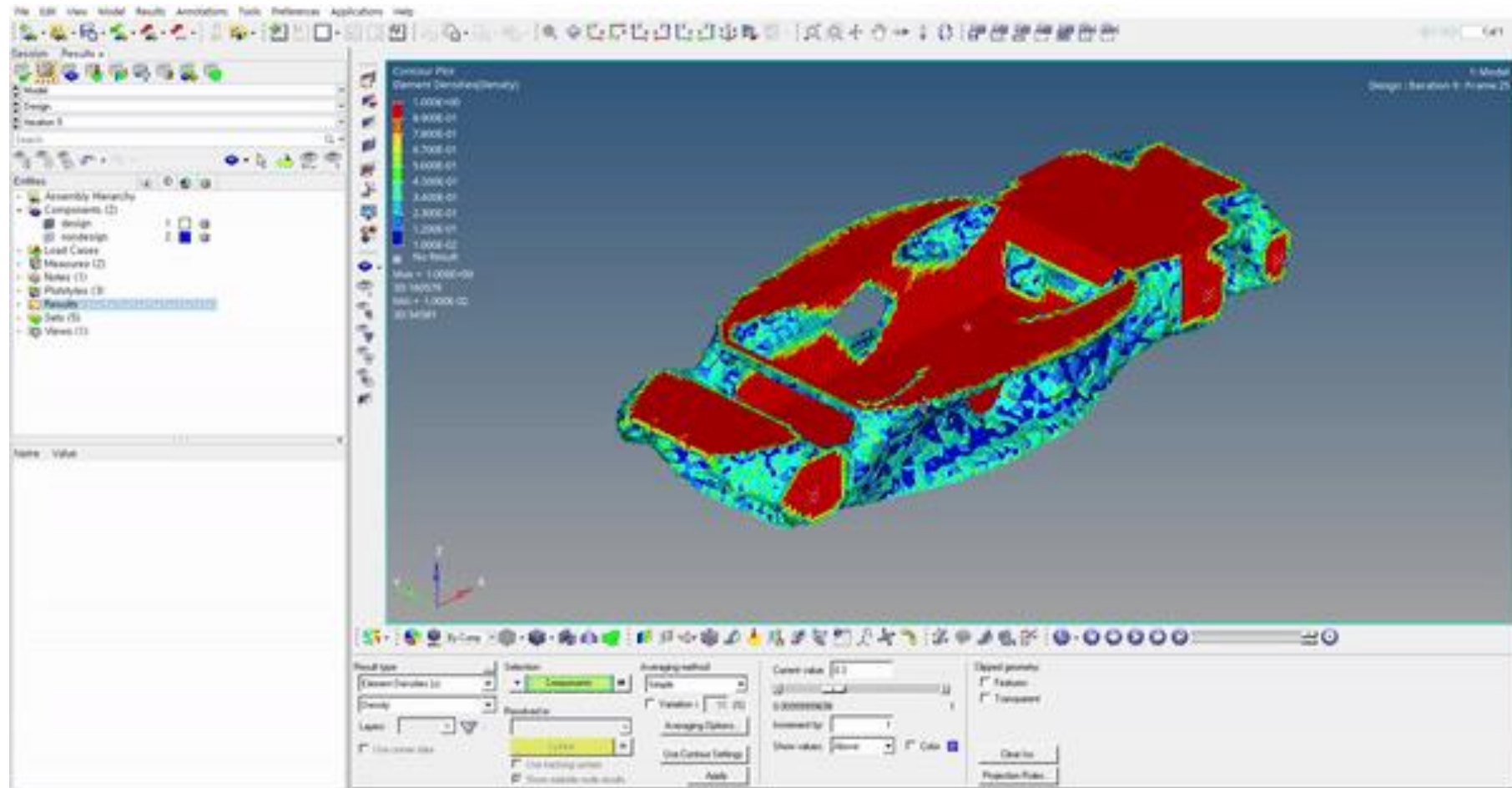
최적 모델



부피율 제한 조건 0.3, 컴플라이언스 최소화를 목적으로 하는 Topology Optimization
Element Densities 0.3으로 설정하여 모델 확인

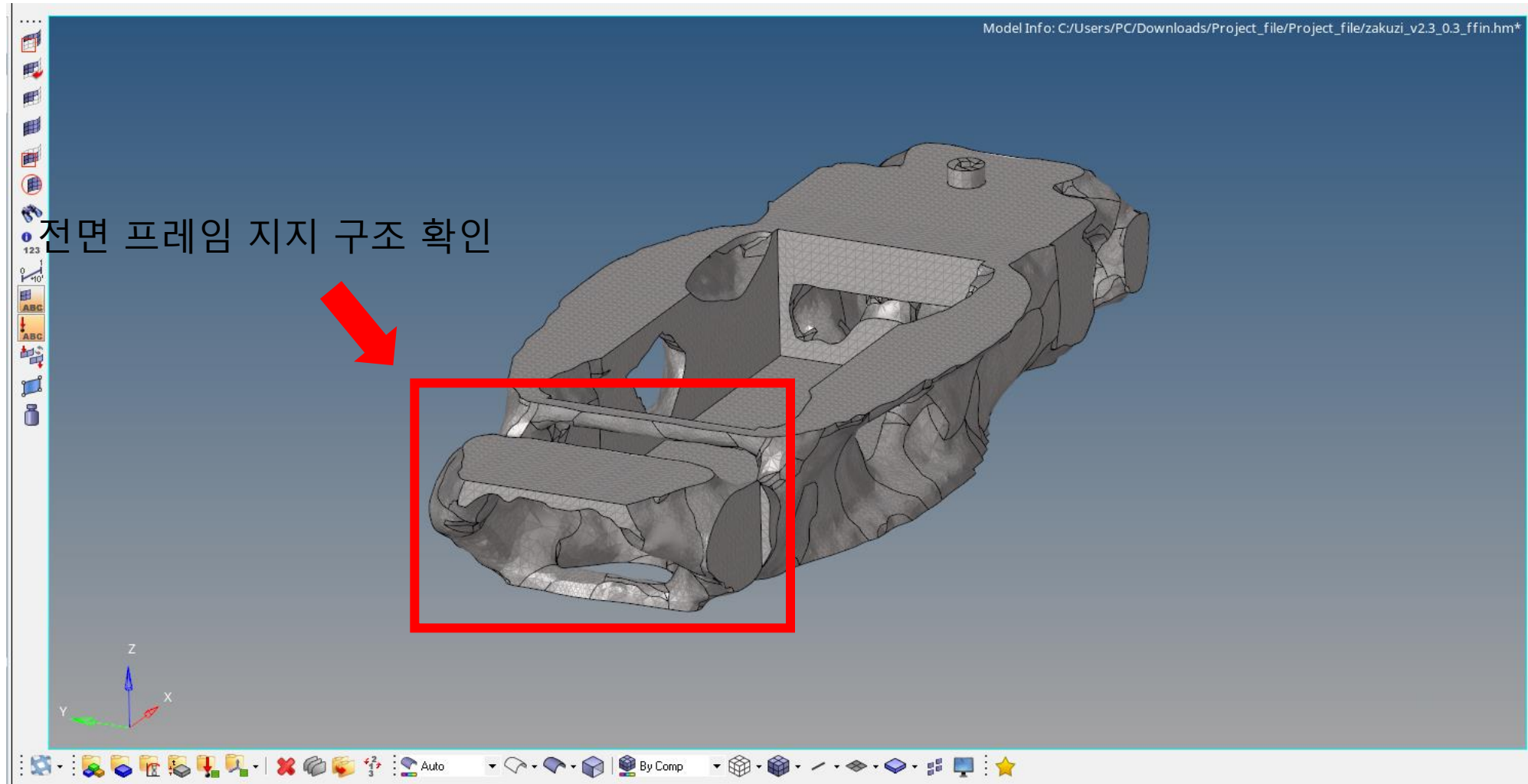
05. 연구 결과

최적 모델



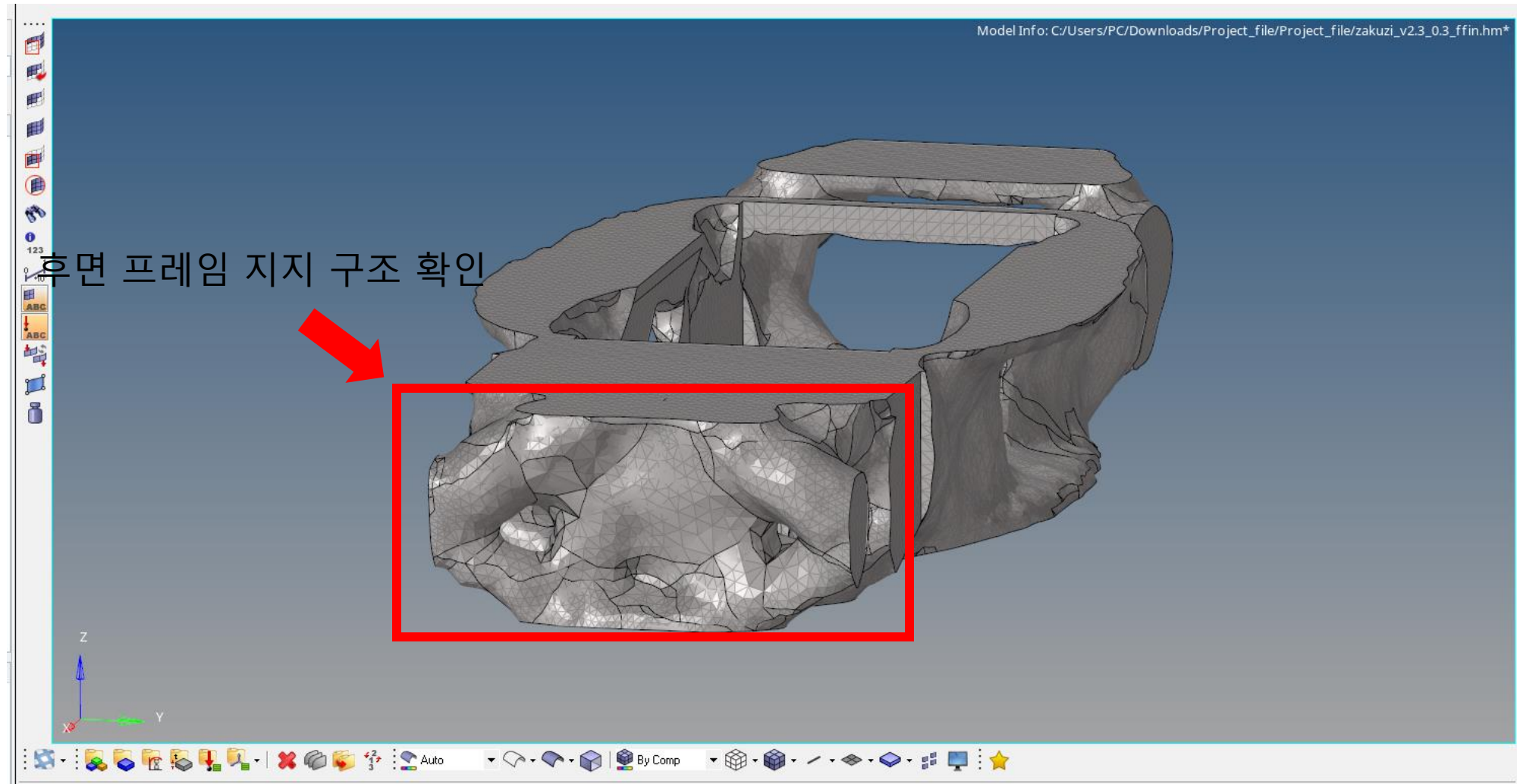
05. 연구 결과

최적 모델



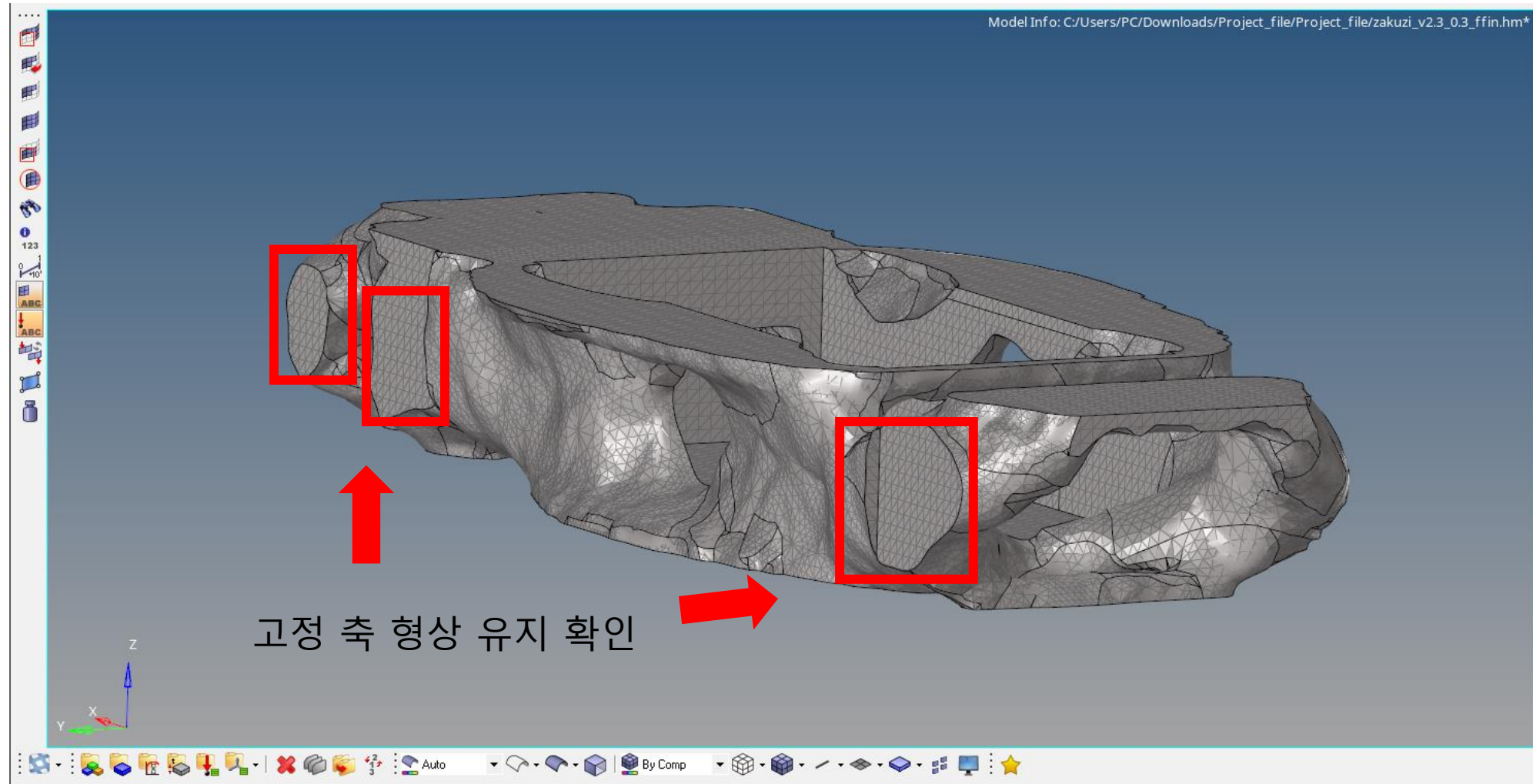
05. 연구 결과

최적 모델



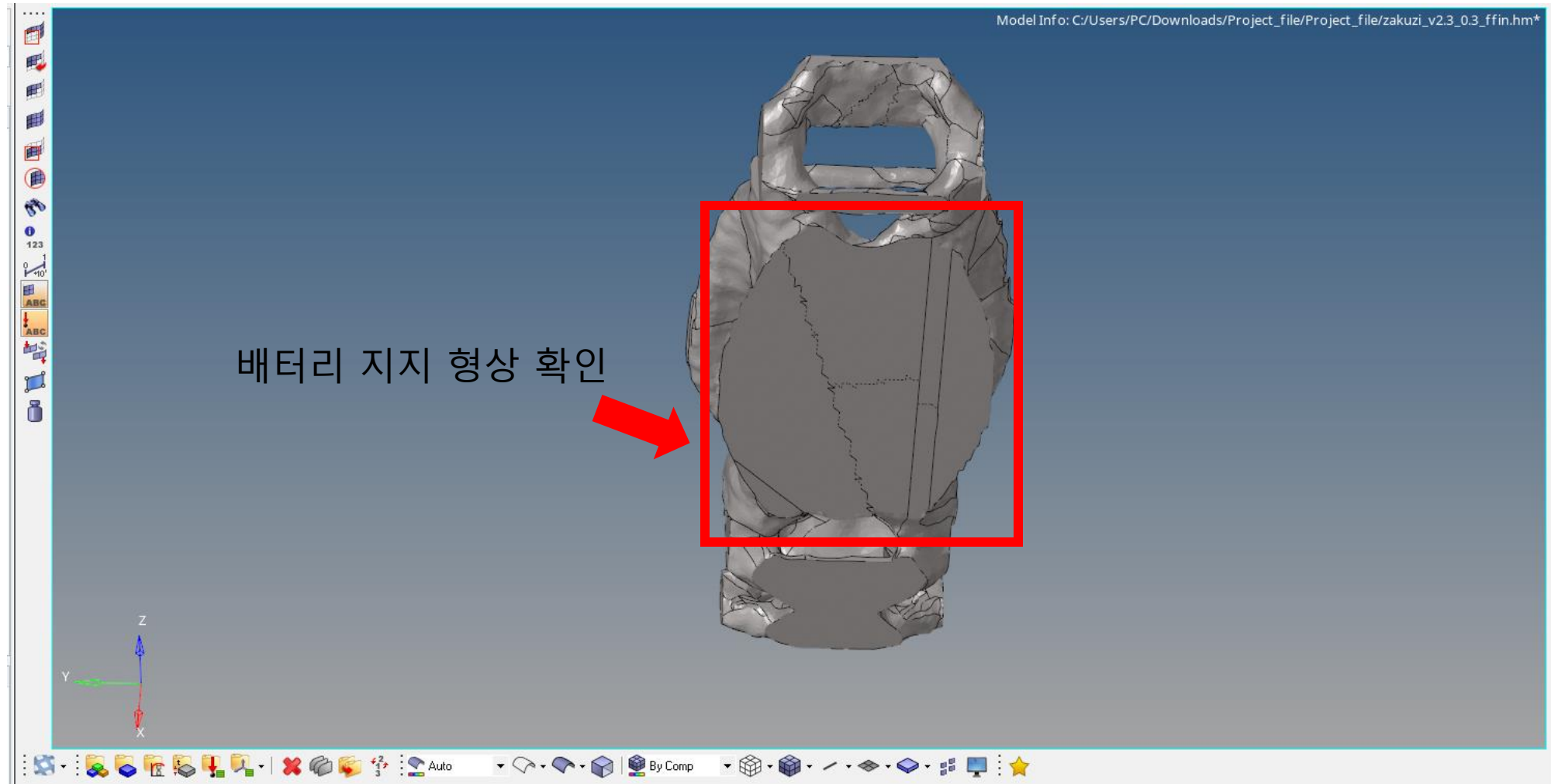
05. 연구 결과

최적 모델



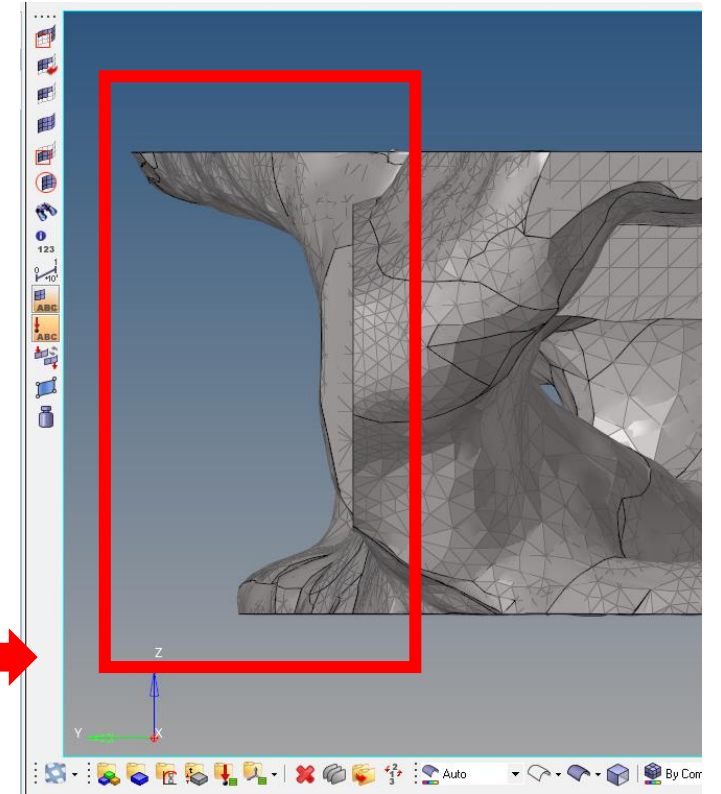
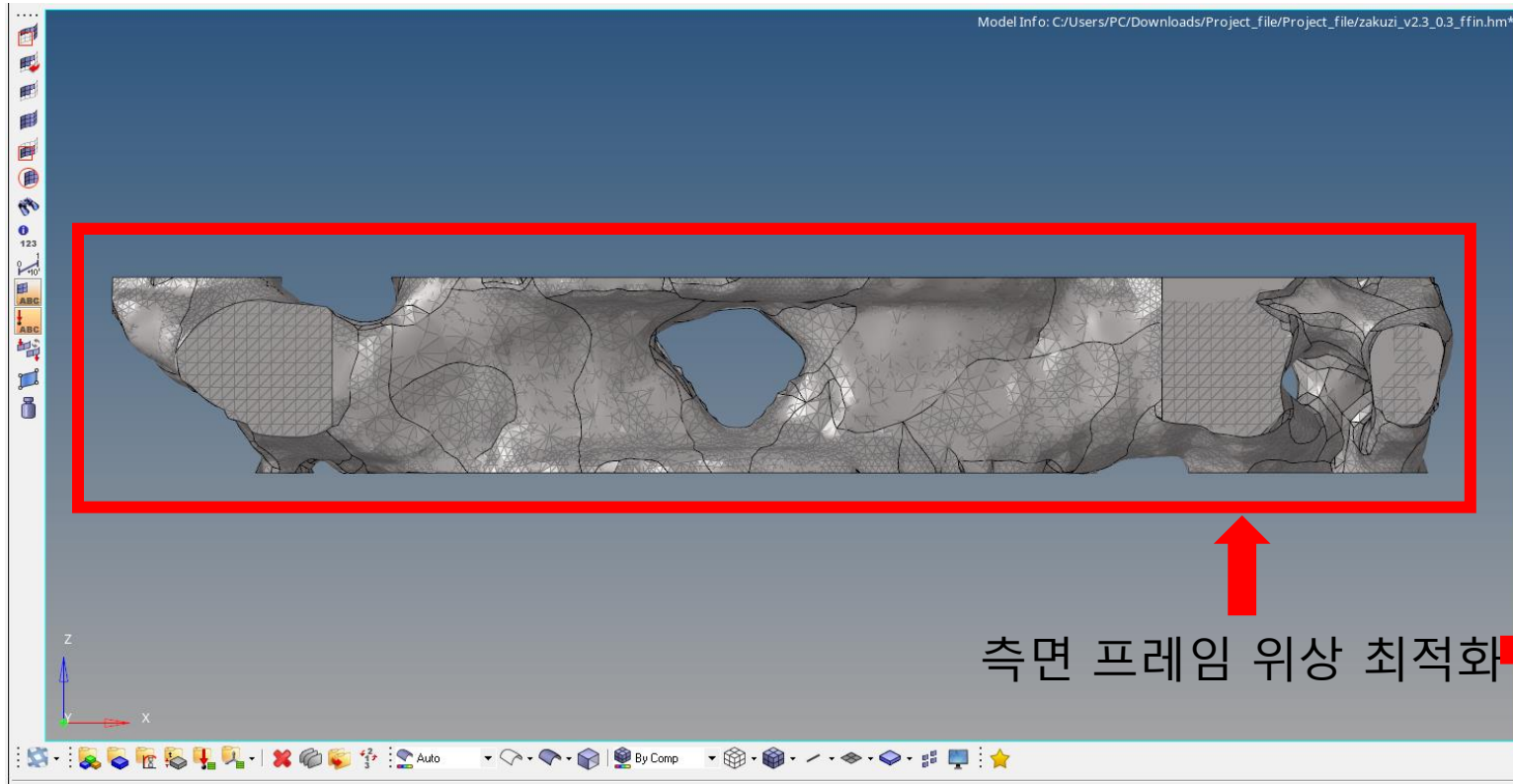
05. 연구 결과

최적 모델



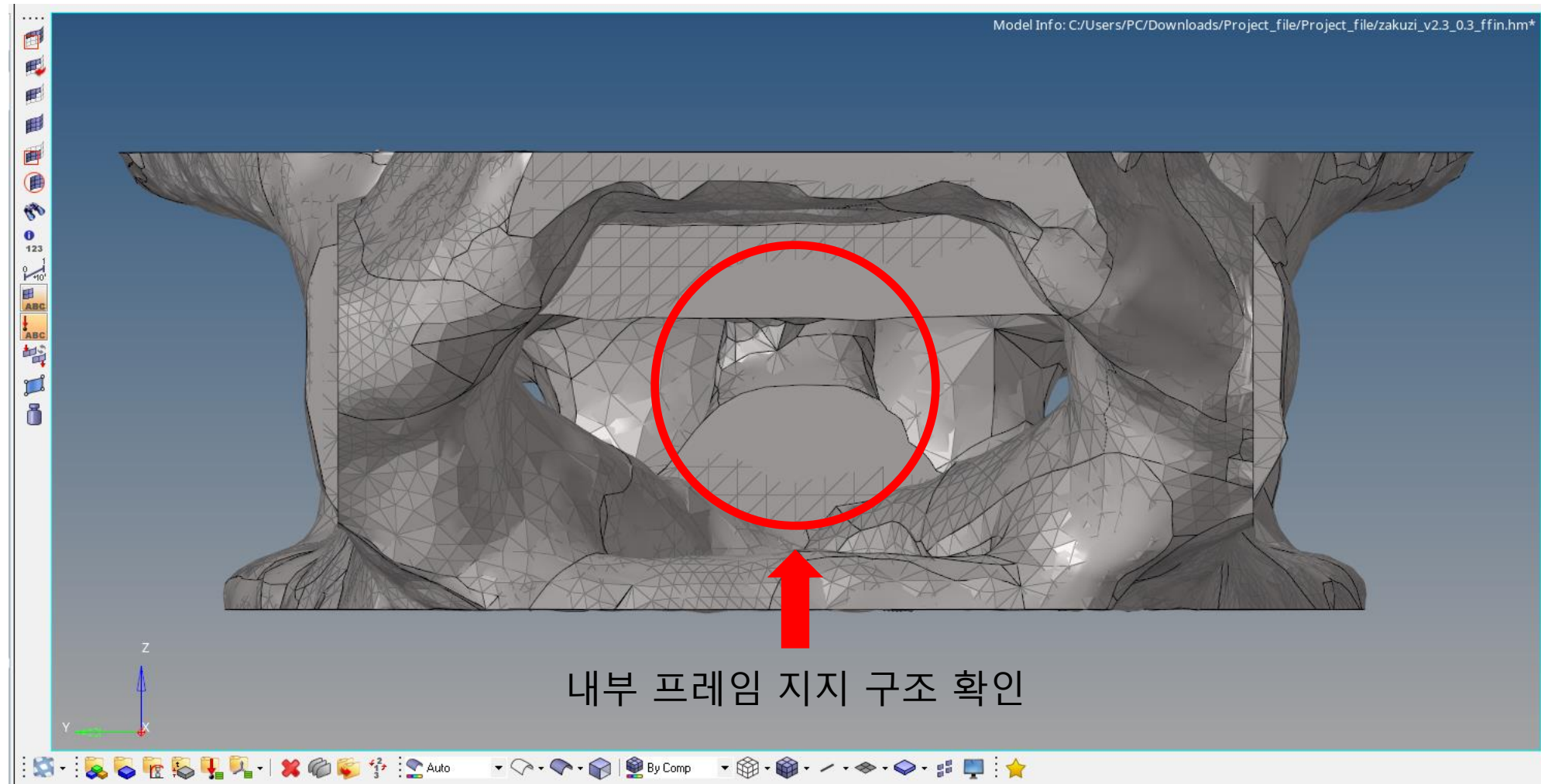
05. 연구 결과

최적 모델



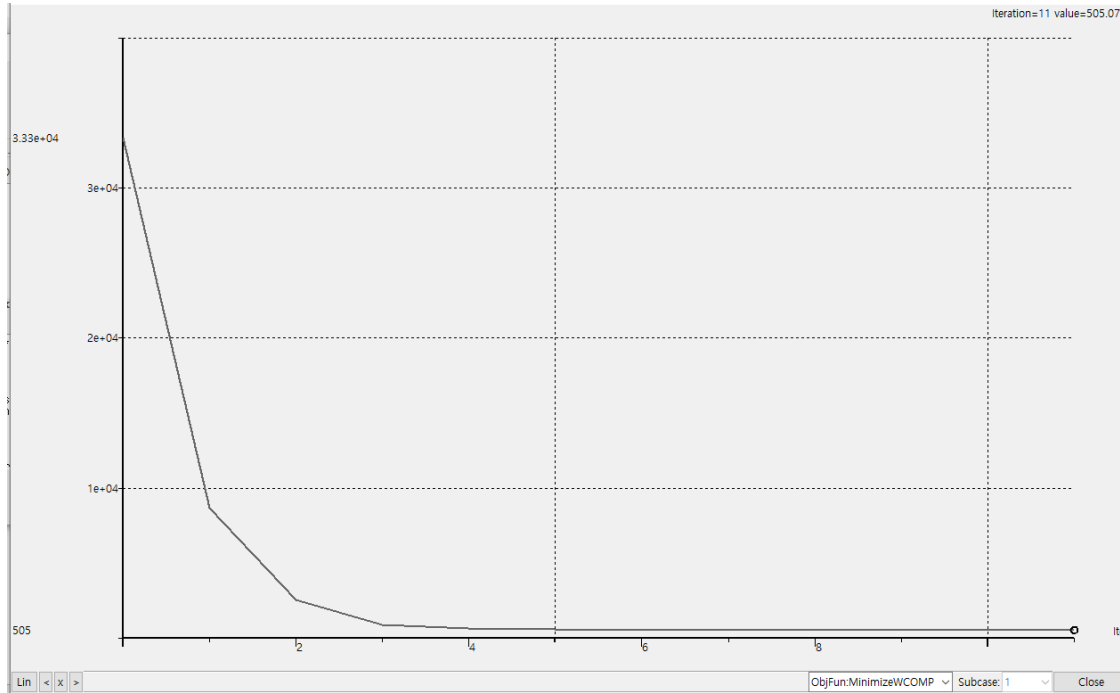
05. 연구 결과

최적 모델



05. 연구 결과

결과 분석



Note : Epsilon = Residual Strain Energy Ratio.

RETAINED RESPONSES TABLE

Response Type User-ID	Response Label	Subcase /RANDPS /Model MID/ +Frqncy Mode No. /Times	Grid/ Element/ /Reg	DOF/ Comp	Response Value	Objective Reference/ Constraint Bound	Viol. %
2	WCOMP Wcomp	--	--	--	5.051E+02	MIN	
1	VOLFR volfrac	--	1	SOLI	3.000E-01	< 3.000E-01	0.0 A

목적 함수를 통한 컴플라이언스 값이 계속해서 줄어듦을 확인할 수 있음

11번의 Iteration 후에 최적 값 도출 -> 최종 목적 함수 값: 5.05079E+02

05. 연구 결과

결과 분석

<ITERATION 11 해석 out 파일>

ITERATION 11
the 2nd satisfied convergence ratio = 3.4482E-03

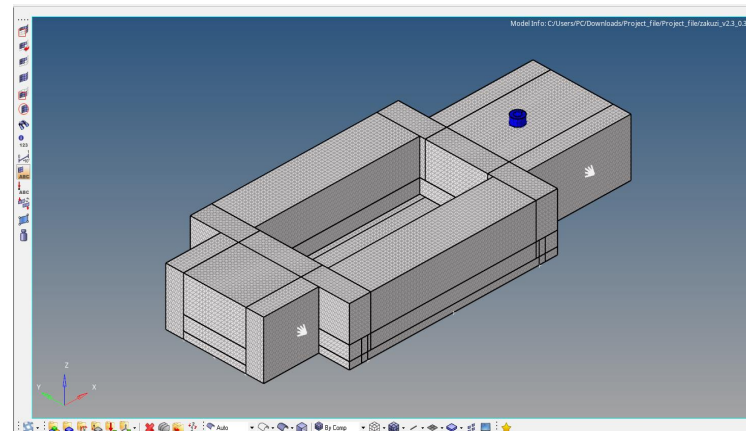
Objective Function (Minimize WCOMP) = 5.05079E+02 % change = -0.34
Maximum Constraint Violation % = 0.15665E-03
Design Volume Fraction = 3.00000E-01 Mass = 1.91695E+01
Discreteness Index = 0.67

Density %

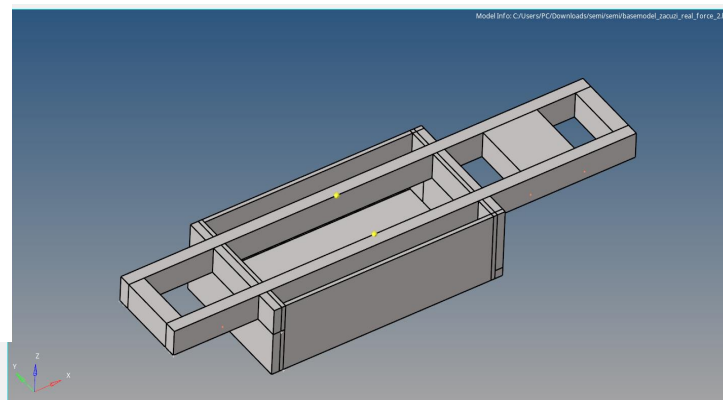
0.0-0.1	57.3
0.1-0.2	1.0
0.2-0.3	3.4
0.3-0.4	1.3
0.4-0.5	0.8
0.5-0.6	3.4
0.6-0.7	1.0
0.7-0.8	3.7
0.8-0.9	1.4
0.9-1.0	26.7



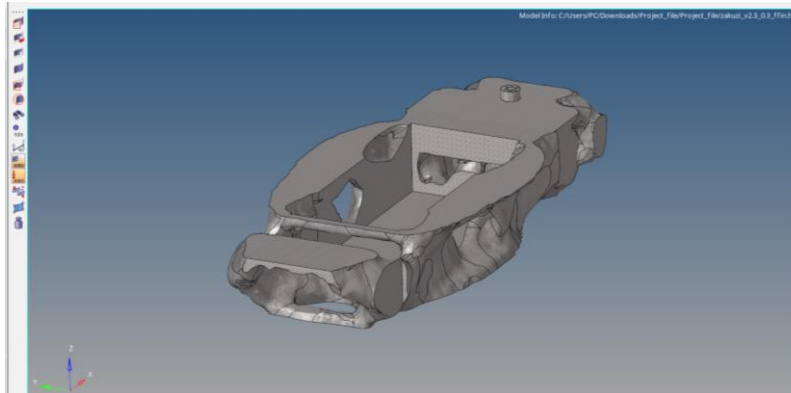
0.3 Density 이상의
부피 밀도가 38.3% 임을 확인



43%



38.3%

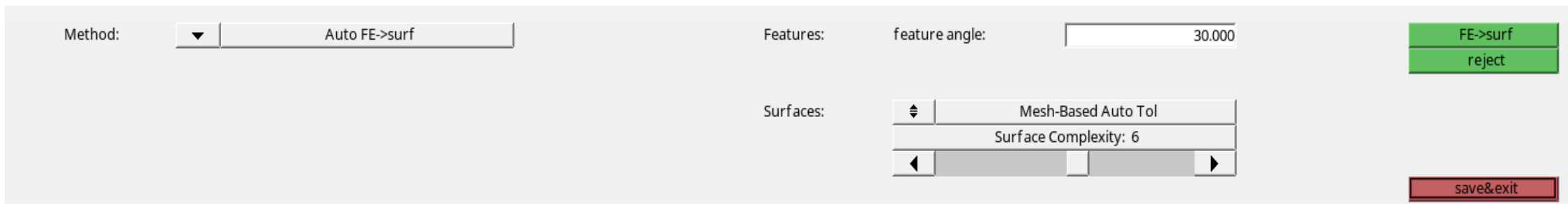
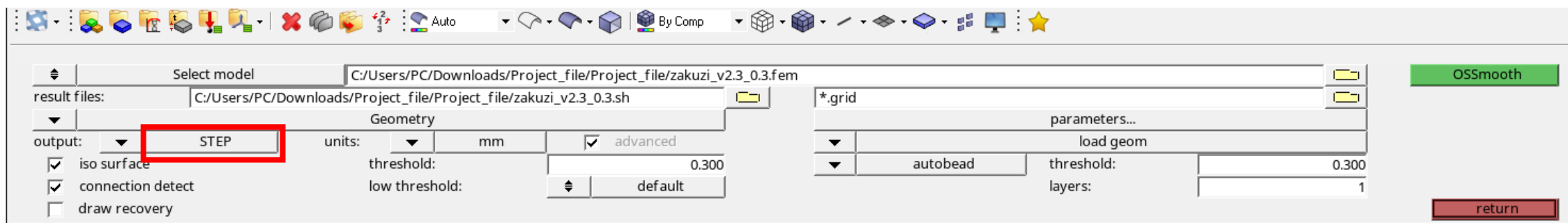


“Base 모델 대비 최적 모델 부피 11% 감소”

05. 연구 결과

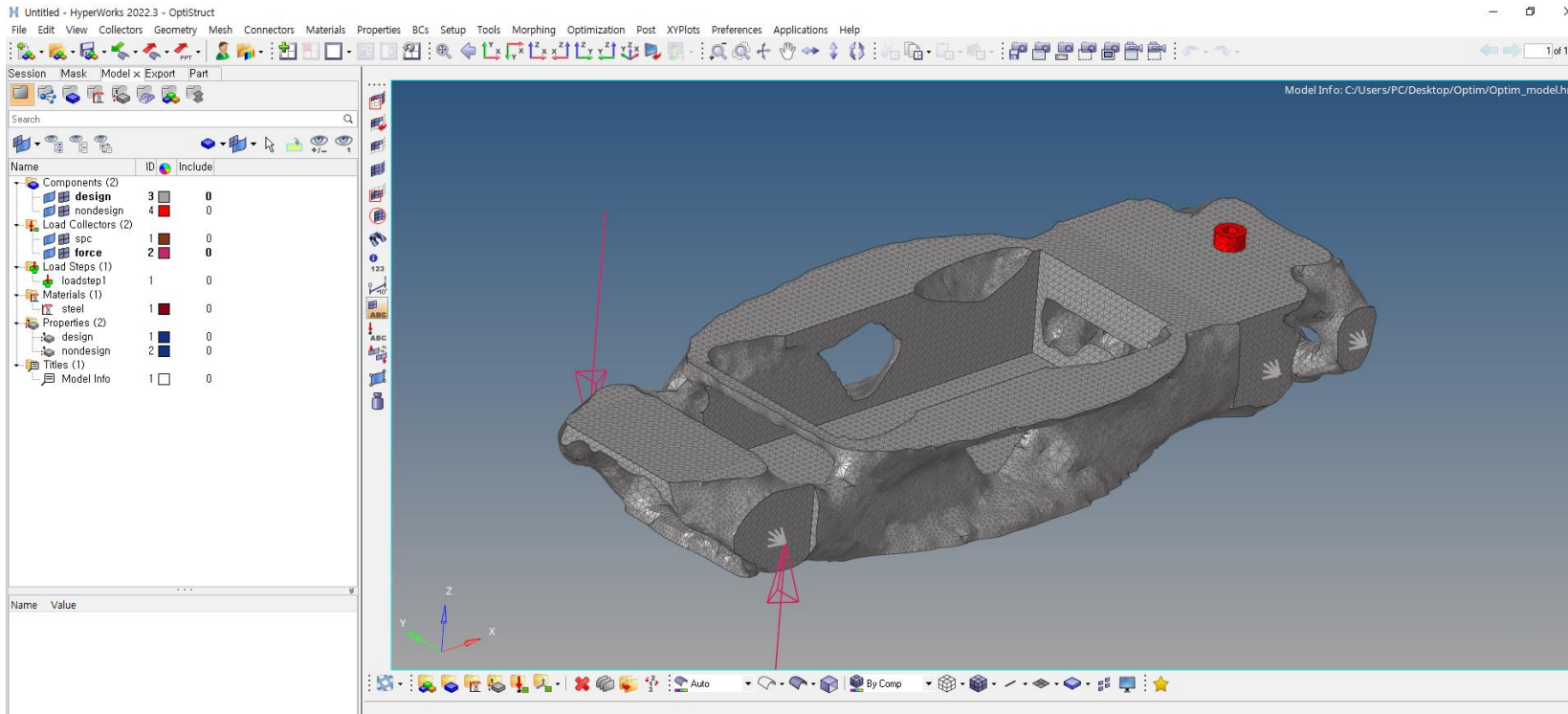
결과 분석

최적 모델 형상을 토대로 굽힘 및 비틀림 해석 추가적으로 진행하고자 함
해석 결과를 fem파일로 변환 후, opistruct 모델로 변환 시도
(Optimization - OSSmooth)



05. 연구 결과

결과 분석



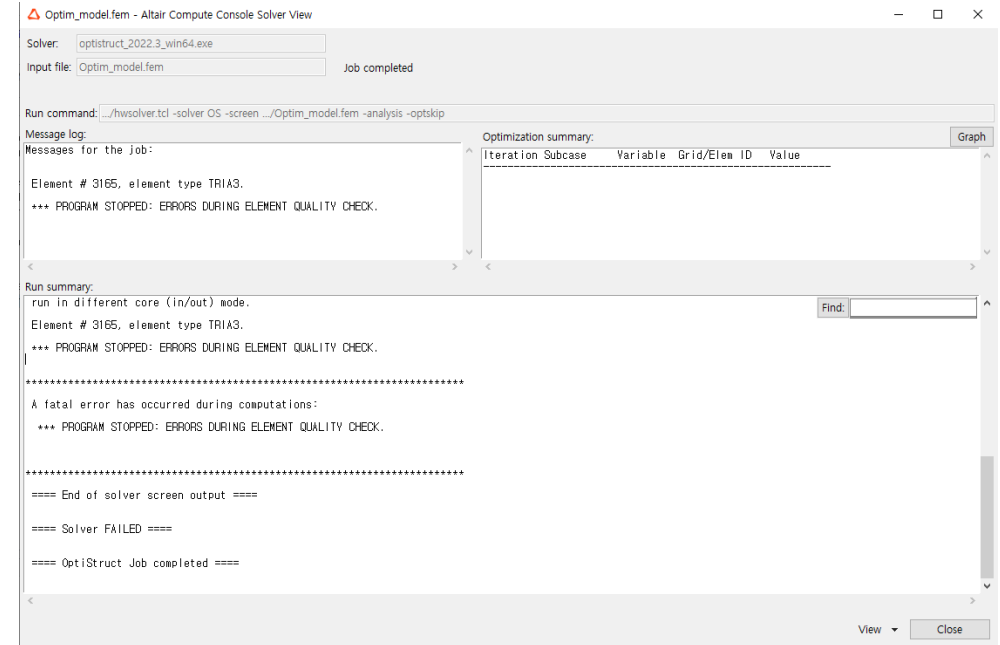
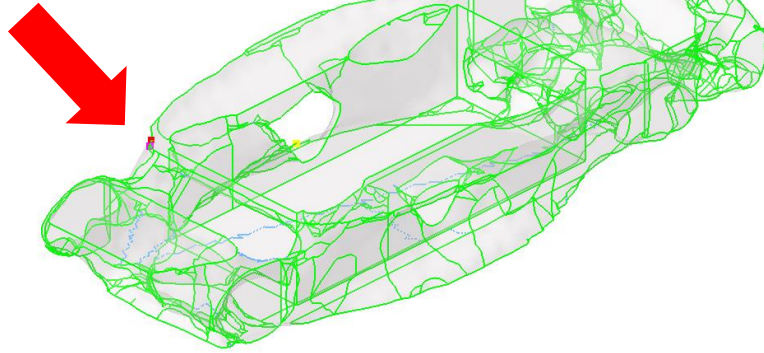
그러나 Analysis 시, PSOLID property 적용 실패 → Mesh가 2d 요소로 생성됨을 확인

Autocleanup, edge edit → equivalence 적용을 통해 Solid 및 Mesh 재생성

05. 연구 결과

결과 분석

“문제 element”



수정 후 Analysis를 재시도하였으나, element 오류 코드 발생
Geometry 체크를 통해 문제의 element를 확인했으나, 해당 요소의 수정 방법을 찾지
못하였음
최적 모델이 해석 조건 설정에 어려움을 겪는 복잡한 형상이
라 추정
이후 방법을 찾아, 해당 형상에 대한 굽힘 및 비틀림 테스트를 진행하고자 함

감사합니다.

