Resin Infusion 방식을 이용한 CFRP Monocoque-Body 적층 최적화

숭실대학교 기계공학부 김연수 · 최선규

ALTAIR 숭실대학교 SSARA

01 Outline

02 Condition

03 Optimization & Analysis

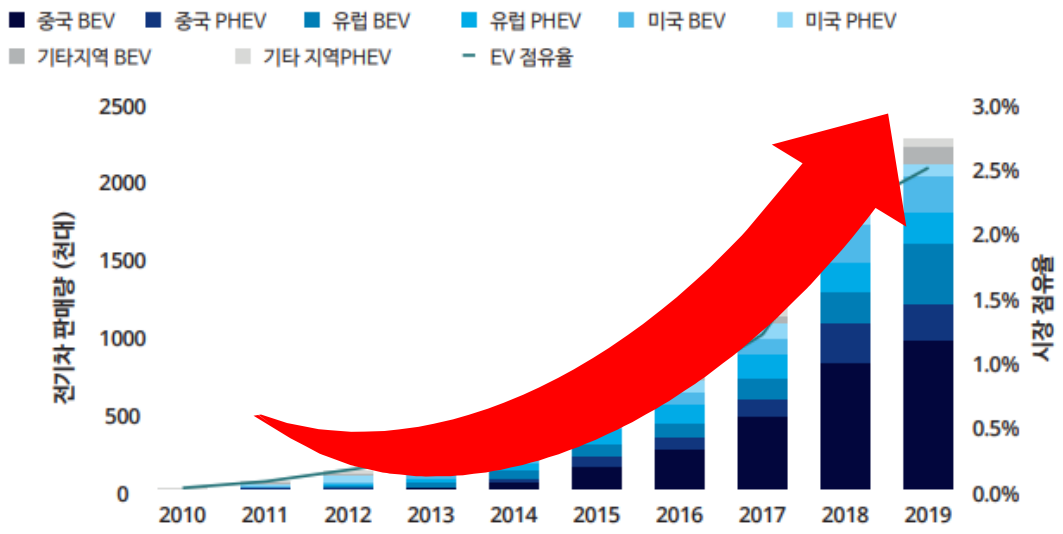
04 Summary

01
Outline

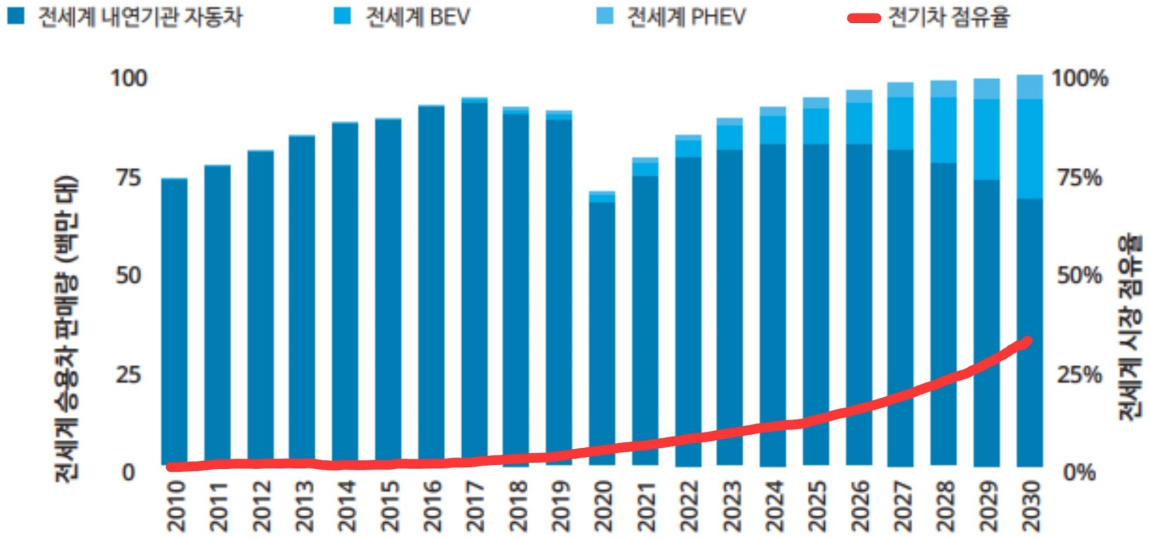
1 Outline

- **전기차 동향**

전기차: 주요 지역 별 연간 판매량



전세계 연간 승용차 및 경차 판매량 전망



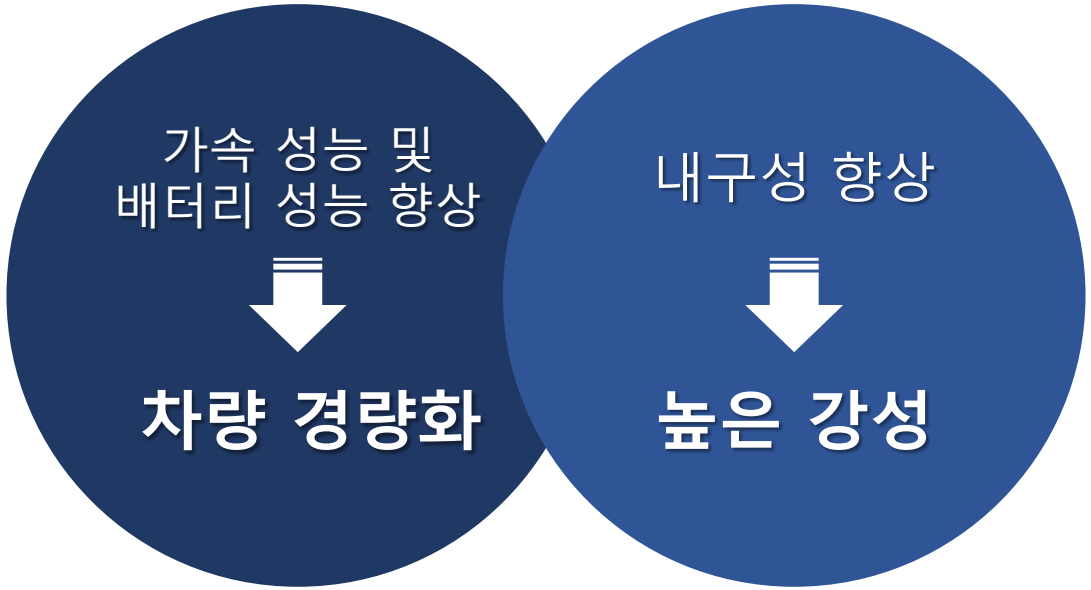
출처 : Dr. Jamie Hamilton, Dr. Bryn Walton 외 4인, 전기차 시장 전망

1 Outline

- **SF.E-22**

1 Outline

- **SF.E-22**



1) 적층 최적화를 통해 모노코크 바디에 대한 경량화 진행

2) Static Analysis를 통해 강성 확보

1 Outline

- **진행 개요**

Material Realization

Basic Model Analysis

Optimization

Optimization

Opti 1
Shape

▼

Opti 2
Thickness

▼

Analysis 1
Static Analysis

▼

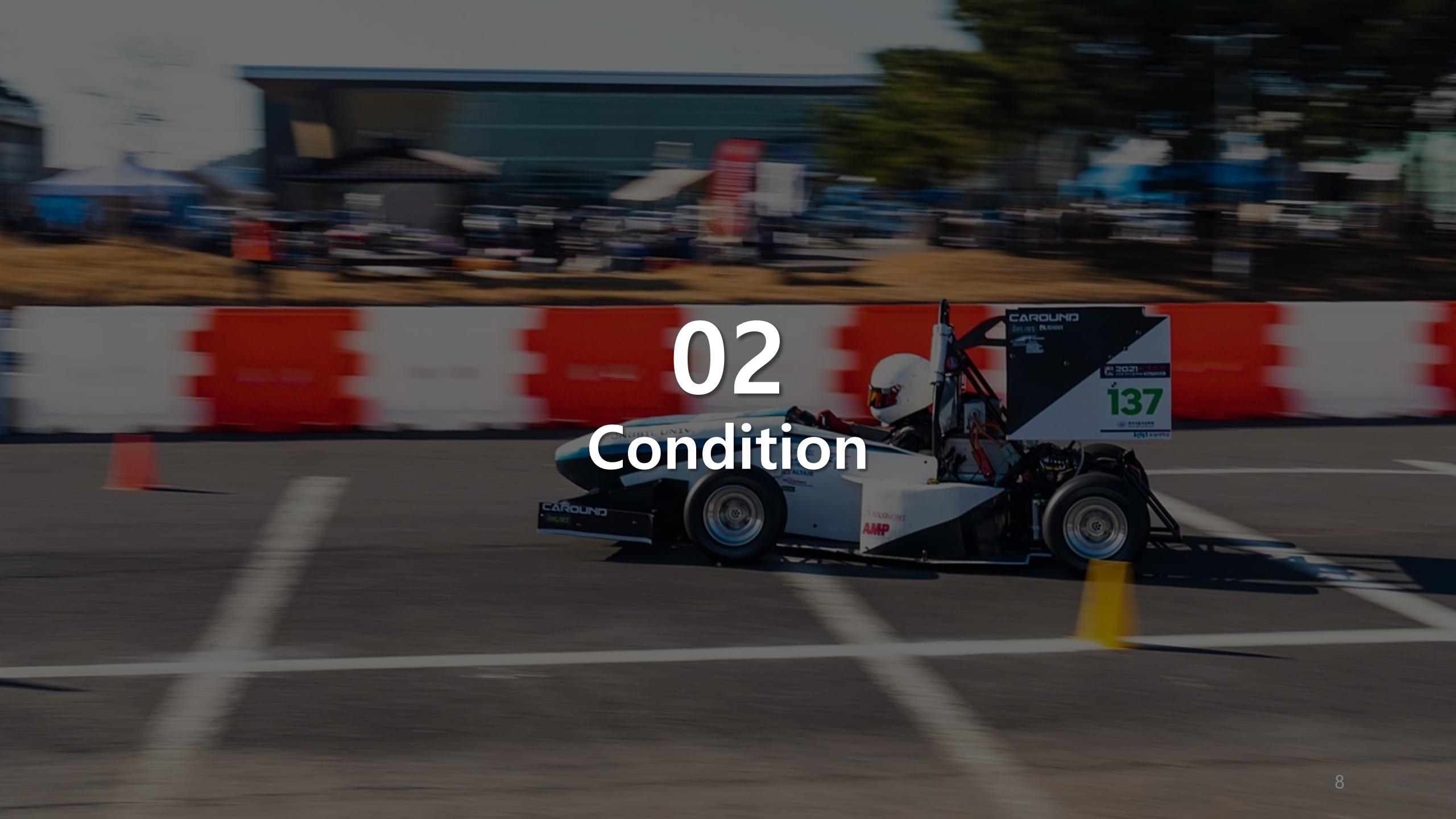
Retouching

▼

Analysis 2
Static Analysis

▼

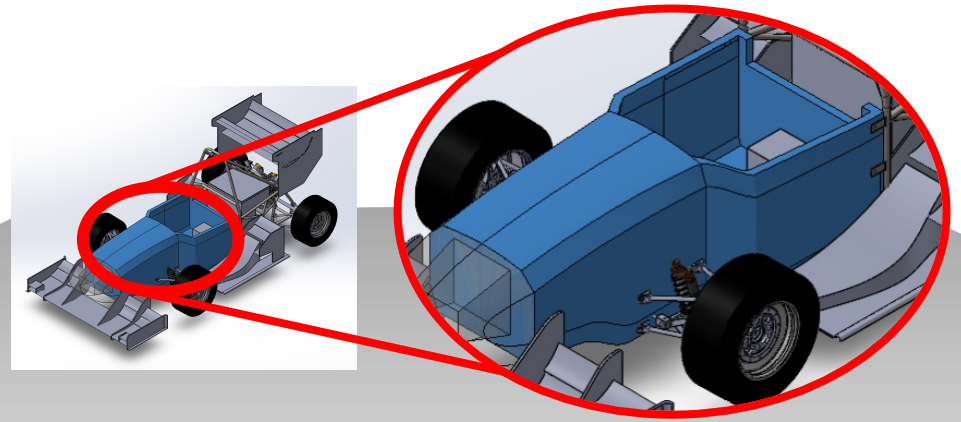
Results

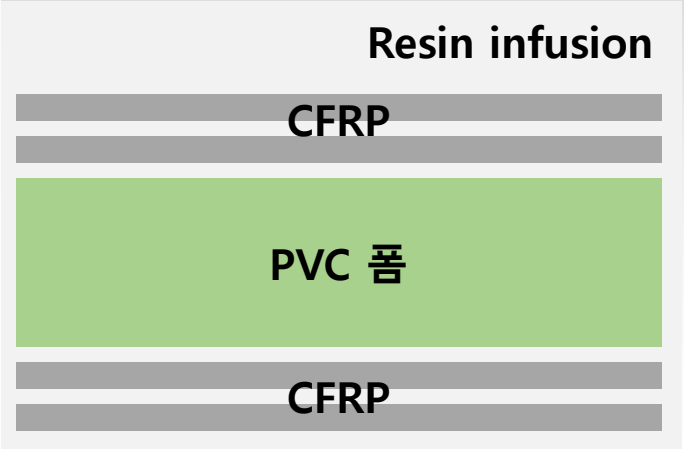


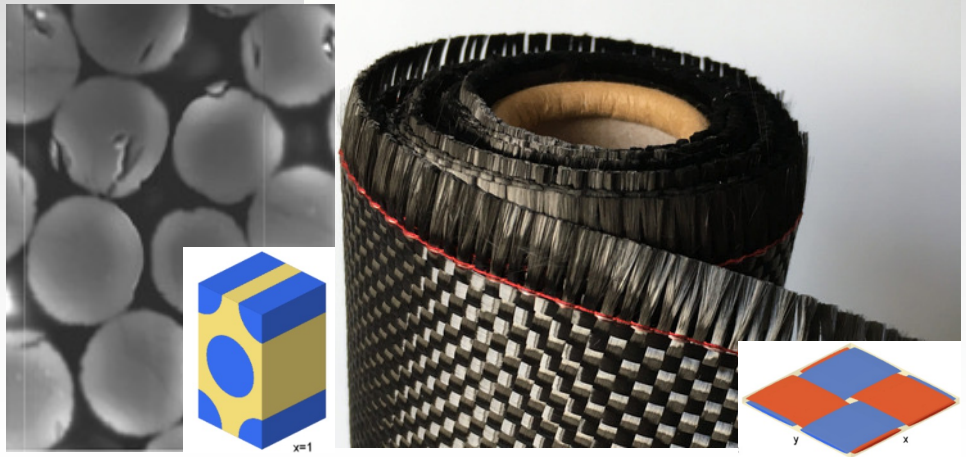
02
Condition

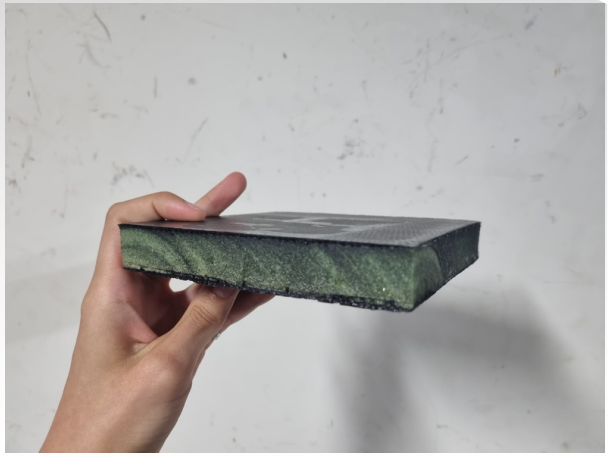
2 Condition

- 복합재 구현



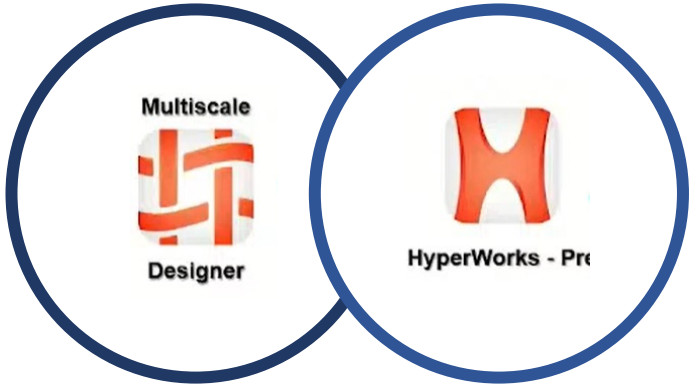






2 Condition

- **복합재 물성치**



▶CFRP 물성치

E1	220.632 GPa
E2	15.886 GPa
ν12	0.25
ν23	0.2
G12	19.857GPa
E1_C	198.569GPa
ρ	1.758E-6 kg/mm³

▶CFRP+Resin Ply 물성치

E1	90.1368 GPa
E2	90.1369 GPa
ν12	0.03412
G12	6.8103 GPa
G13	6.8109 GPa
G23	4.0828 GPa
ρ	1.636E-6 kg/mm³

▶Resin 물성치

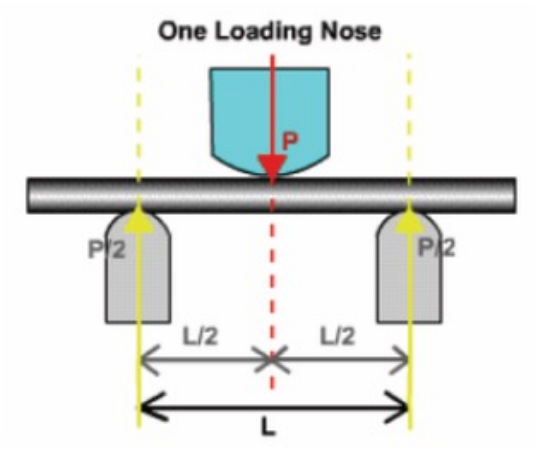
E	3.689 GPa
ν	0.38
E_C	3.903 Gpa
ρ	1.251E-6 kg/mm³

▶PVC Ply 물성치

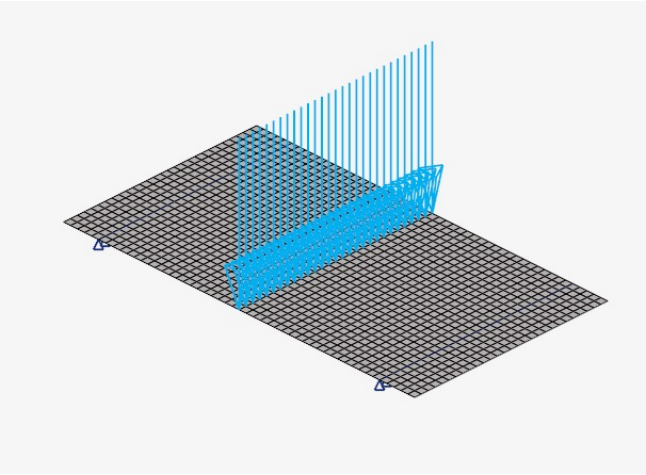
E	60MPa
ν	0.36
E_C	104MPa
ρ	8.0E-8 kg/mm³

2 Condition

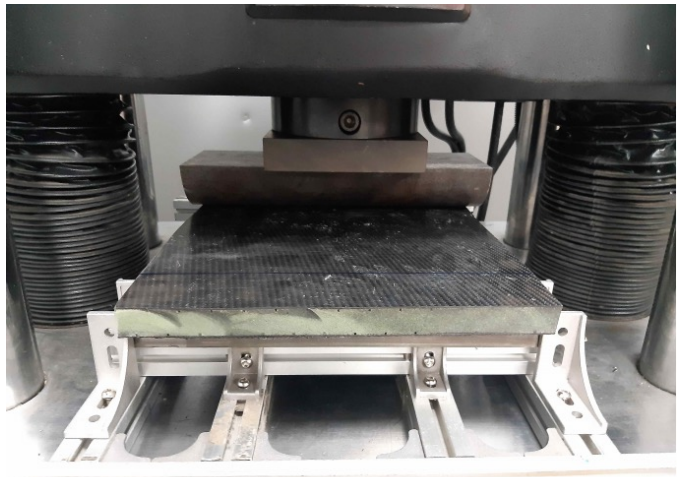
- 복합재 시험



A. 3점 굽힘 FBD



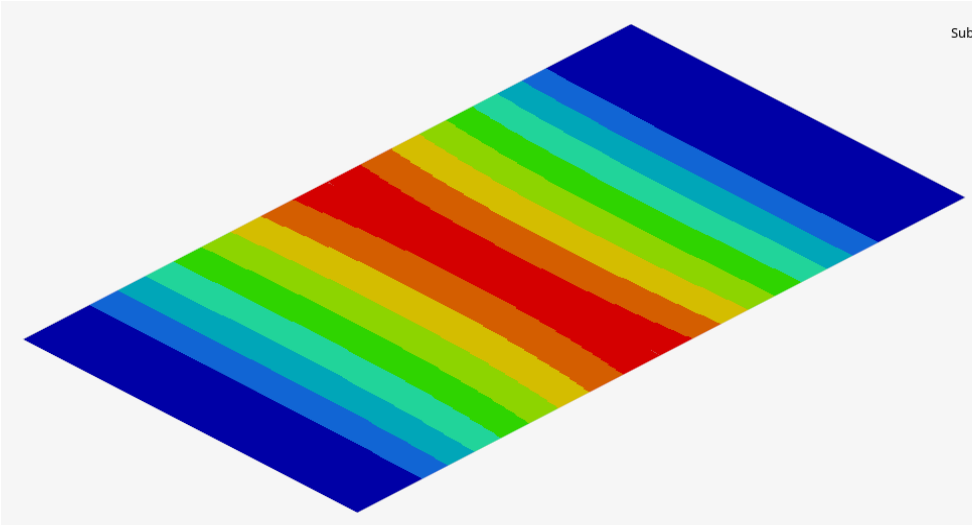
B. HyperWorks 구현



C. 실제 실험 사진

2 Condition

- **복합재 시험**



방 법	변 형 (mm)			
	10장		30장	
	4000 N	6000N	4000 N	6000N
시험값	3.354	4.627	1.945	2.555
해석값	3.180	4.768	1.979	2.968
오차(%)	5.187	-3.047	-1.748	-16.164

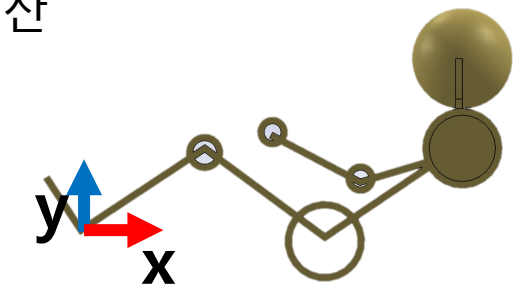
2 Condition

- **Load 선정 : 무게 중심 산출**

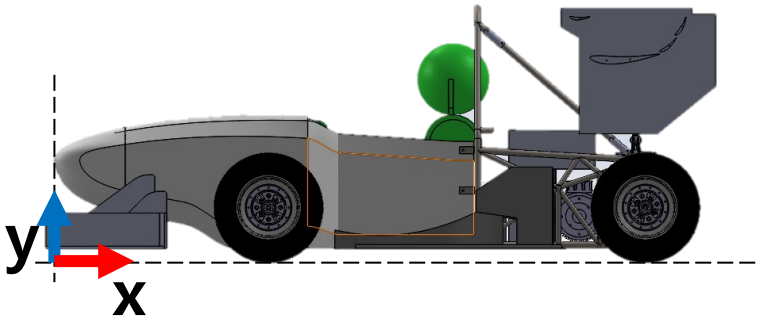
▶ 무게중심 공식

$$X_P = \frac{\sum Xm}{\sum m}$$

▶ 드라이버 무게중심 좌표 계산



▶ 차량 어셈 무게중심 좌표 계산

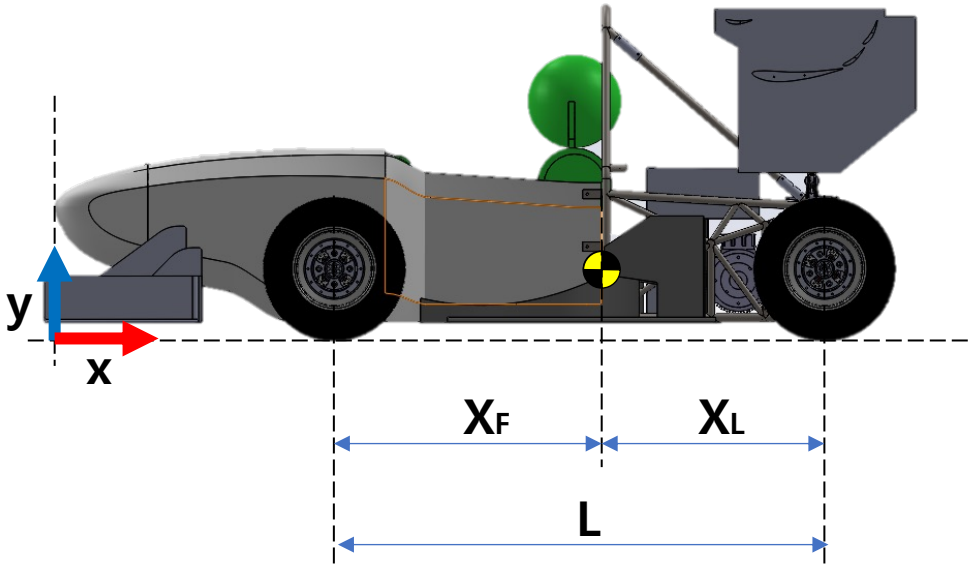


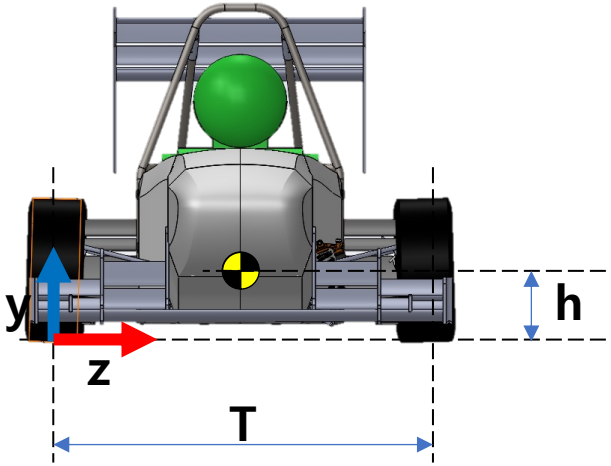
신체 분절	무게(kg)	중심 위치(%)	X(mm)	Y(mm)
머리, 목	6.715	50	1152.37	461.8
몸통	43.435	45	928.92	133.76
대퇴	16.49	43.3	541.56	150.33
하퇴	7.65	43.3	241.25	175.62
발	2.38	42.9	43.89	102.83
상완	4.59	43.6	963.04	204.07
하완	2.72	43	716.41	237.23
손	1.02	50.6	587.82	332.76

부품	무게(kg)	X(mm)	Y(mm)
배터리박스	63	1999.62	202.86
컨트롤러	5.5	1780	205.7
회로박스	4	2111.77	545.7
LV박스	4	1696.63	97.3
모노코크	22	1108.86	307.75
후방프레임	16	2115.98	278.4
프론트쇽	0.409	944.85	221.03
리어쇽	0.394	2388	500.14
모터+모터마운트	23	2249.3	193.6
LSD+LSD마운트+조인트컵+대기어	4.99	2534.46	249.22
동력축(CV축) 물어볼것	3.24	2538.12	235.62
프론트 밸크랭크	0.155	947.22	93.61
리어 밸크랭크	0.172	2499.7	484.56
베벨기어박스	1.5	1504.17	503.06
퀵릴리즈+스티어링휠	0.75	1169	512.7
랙앤피니언+푸쉬로드	1.02	1066.56	144.7
드라이버	85	1480.07	409.39
페달어셈블리	4	568.76	324.28
노즈	1.5	235.99	321.69
박스 이외 전선 총 무게	0.5	###	###
안전벨트	2.23	###	###
시트	3	1485.37	299.16

2 Condition

- **Load 선정 : 무게 중심 결과**

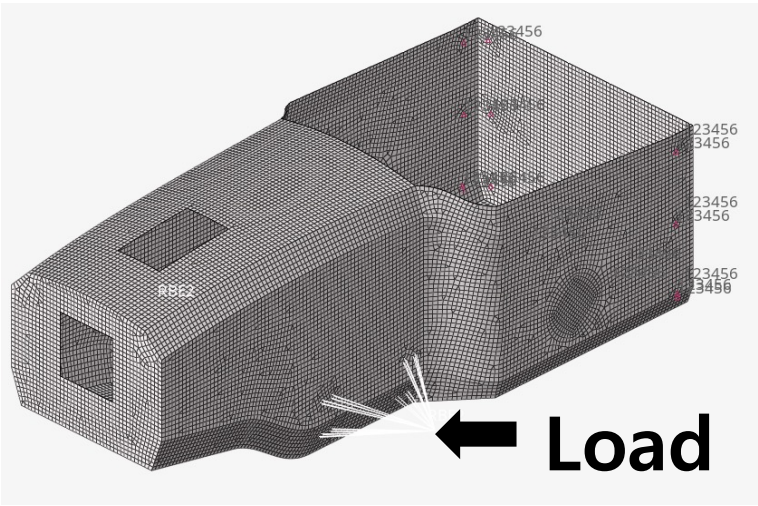


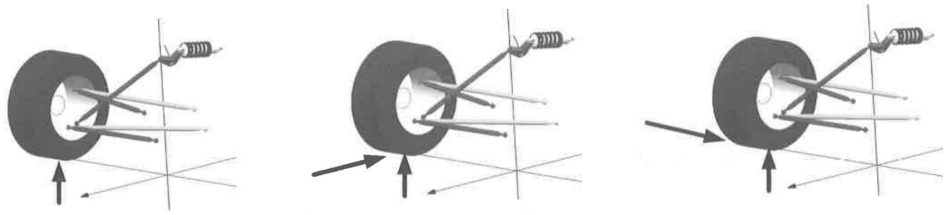


계산 결과	x	y	XF	XL	L	T	Weight
	1706.77 mm	295.66 mm	838.23 mm	751.77 mm	1590 mm	1190 mm	276.84 kg

2 Condition

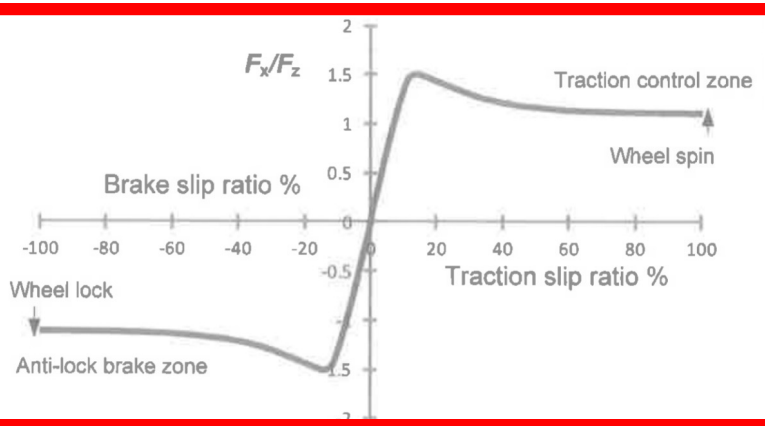
- **Load 선정 : 최대 하중 조건**





ㄴ최대수직하중 ㄴ최대제동하중 ㄴ최대코너링하중

하중 케이스	동적 영향에 따른 계수
최대 수직 하중	3.0
최대 비틀림 (대각선 반대 방향의 휠)	수직 하중에 대해서 1.3
최대 코너링	수직과 가로 방향 하중에 대해서 1.3
최대 제동	수직과 전후 방향 하중에 대해서 1.3
최대 가속	수직과 가로 방향 하중에 대해서 1.3



출처 : Derek Seward, *Race Car Design*, 2014

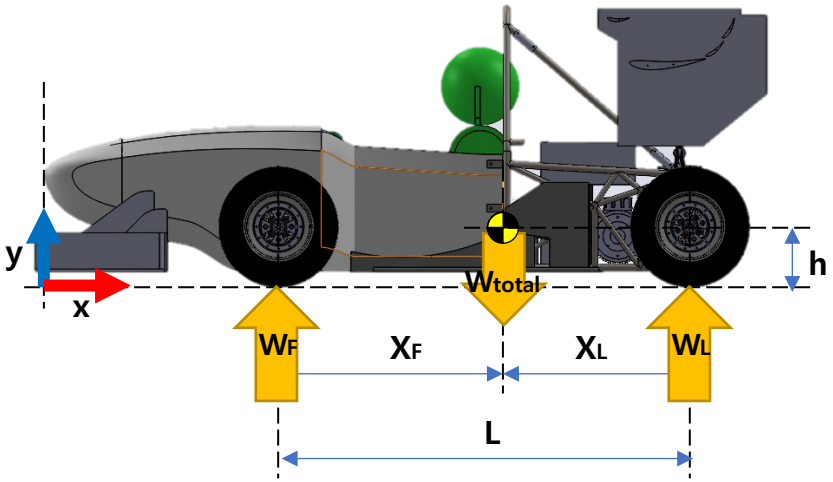
2 Condition

- **Load 선정 : 최대 하중 계산 (1)**

1) 운행 중 프론트 바퀴에 걸리는 최대 수직 하중

$$W_F = (3.0 \times W + 1.3 \times W_{downforce})\frac{X_L}{L} = (3.0 \times 9.81 \times 276.84 + 1.3 \times 67) \times \frac{751.76}{1590} = 3893.31$$

$$W_{FR} = W_{FL} = 0.5\,W_F = 1946.65$$



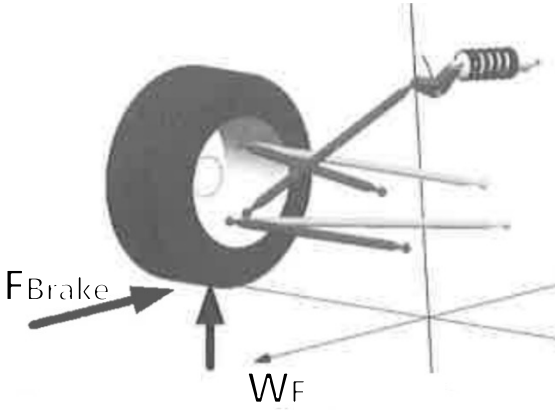
2) 제동 시 프론트 바퀴에 걸리는 최대 하중

$$\triangle W_{Brake} = \pm\frac{W_{total}\mu h}{L} = \pm\frac{(9.81 \times 276.84 + 67) \times 1.5 \times 295.67}{1590} = \pm 776.22$$

$$W_F = 1.3 \times (W_{total}\frac{X_L}{L} + \triangle W_{Brake}) = 1.3 \times ((9.81 \times 276.84 + 67) \times \frac{751.76}{1590} + 776.22) = 2719.52$$

$$F_{Brake} = W_F\,\mu = 2719.52 \times 1.5 = 4079.28$$

$$W_{FR} = W_{FL} = 0.5\,W_F = 1359.76\,,\quad F_{brakeR} = F_{brakeL} = 0.5F_{brake} = 2039.64$$



- **Load 선정 : 최대 하중 계산 (2)**

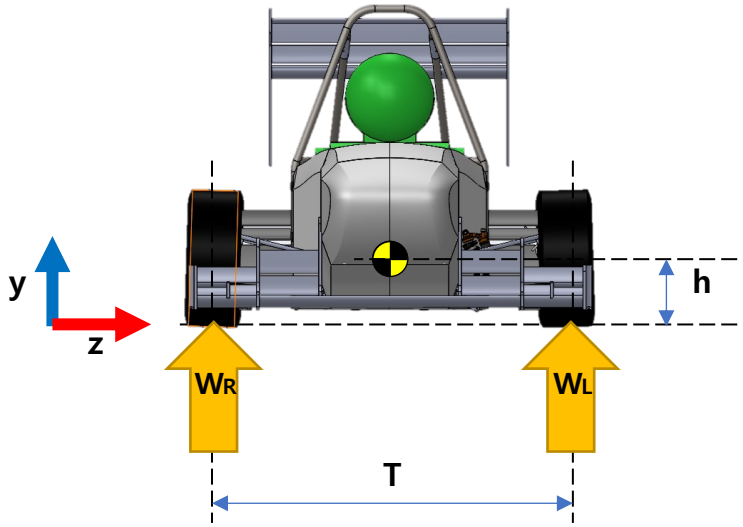
3) 좌회전 시 프론트 바퀴에 걸리는 최대 하중

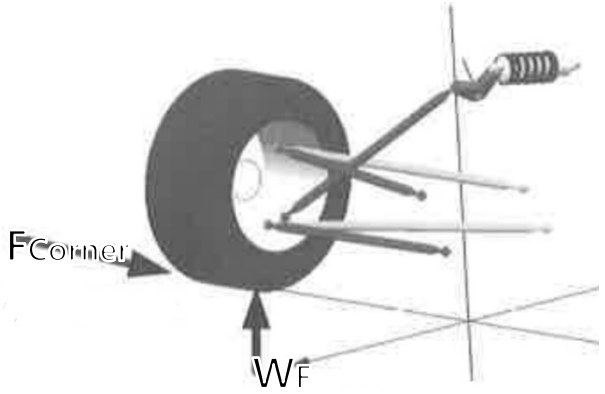
$$\triangle W_{Corner} = \pm \frac{W_{total}\mu h}{T} = \pm \frac{(9.81 \times 276.84 + 67) \times 1.5 \times 295.67}{1190} = \pm 1037.13$$

$$W_{FR} = 1.3 \times (0.5\, W_{total} \frac{X_L}{L} + \eta \triangle W_{Corner})$$
$$= 1.3 \times (0.5 \times (9.81 \times 276.84 + 67) \times \frac{751.76}{1590} + 0.625 \times 1037.13) = 1697.89$$

$$W_{FR} = 1.3 \times (0.5\, W_{total} \frac{X_L}{L} - \eta \triangle W_{Corner})$$
$$= 1.3 \times (0.5 \times (9.81 \times 276.84 + 67) \times \frac{751.76}{1590} - 0.625 \times 1037.13) = 12.55$$

$$F_{cornerR} = W_{FR}\mu = 1697.89 \times 1.5 = 2546.83\,,\quad F_{cornerR} = W_{FR}\mu = 12.55 \times 1.5 = 18.83$$





2 Condition

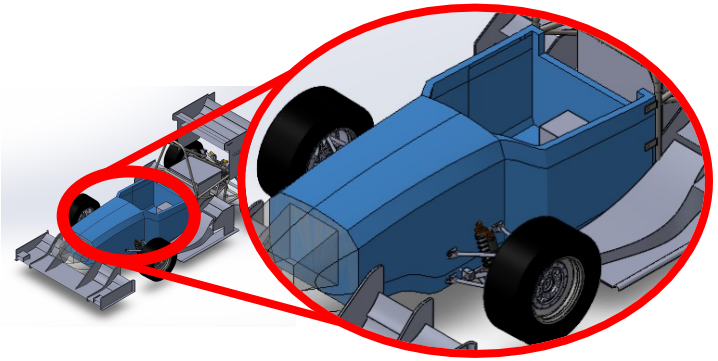
- **Load 선정 결과**

	최대 수직 하중	최대 제동 하중	최대 코너링 하중	
			외측	내측
수직힘(N)	1946.65	1359.76	1697.89	12.55
수평힘(N)	-	2036.64	2546.83	18.83

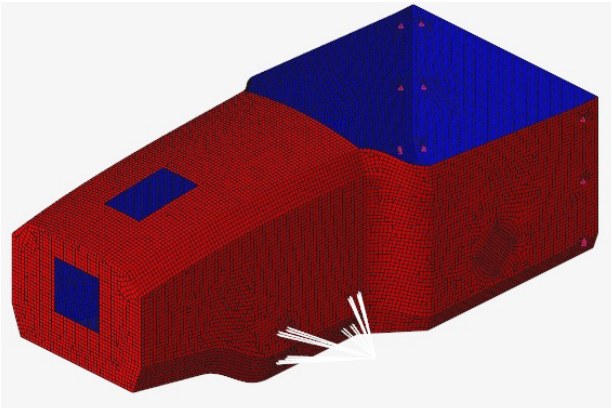
2 Condition

• 기존 형상 해석 조건

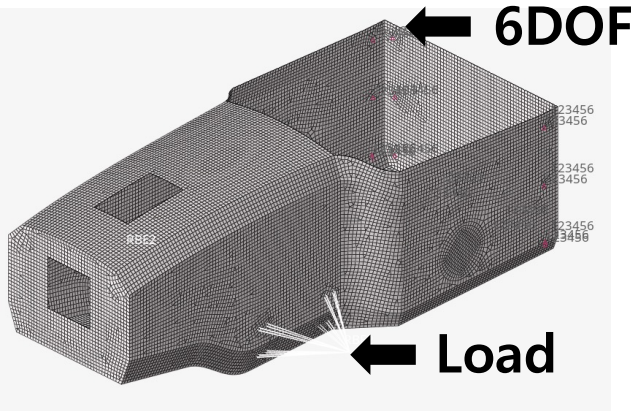
- ▶ SF.E-22에 사용한 모노코크 바디
- ▶ 코어인 PVC 기준, CFRP Ply 30장을 대칭으로 적층되며 방향은 0˚, 45˚를 반복
- ▶ Laminate는 빨간 면을 기준으로 안에서 밖으로 적층
- ▶ 프레임에 볼트로 고정되는 위치의 elements를 6DOF 구속
- ▶ 하드포인트 위치의 elements 들을 기준으로 1D 요소(RBE2)를 생성하여 Load를 입력



ㄴ Part Model



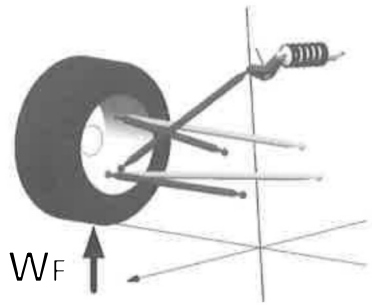
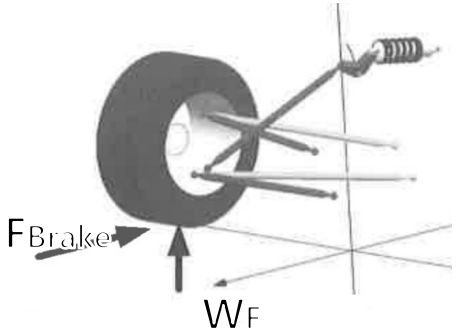
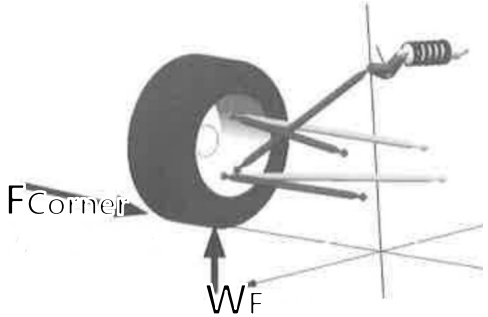
ㄴ Composite Normal Check



ㄴ BC & Load Position

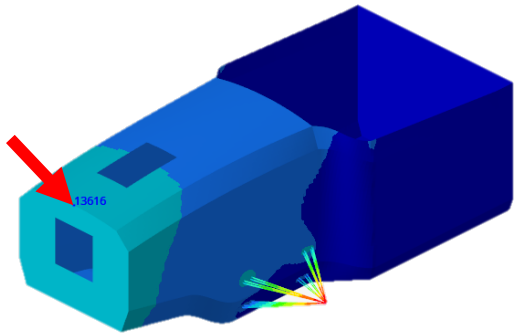
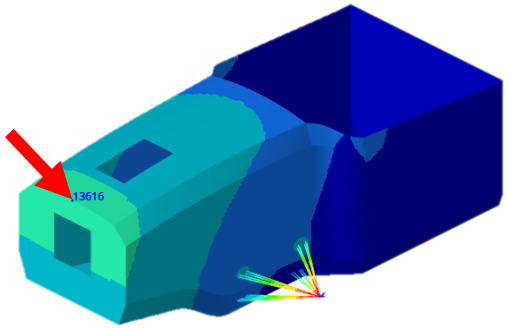
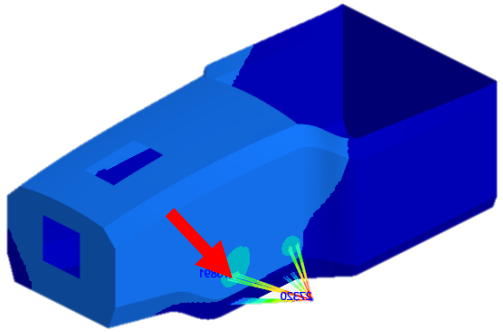
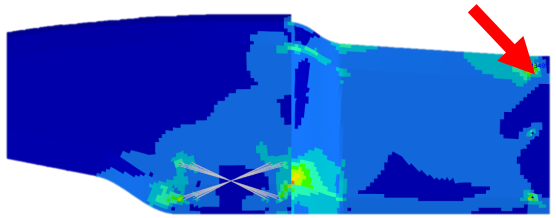
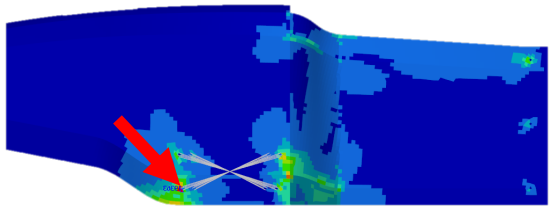
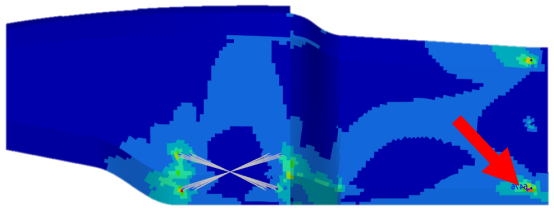
2 Condition

- 기존 형상 해석 결과 (1)

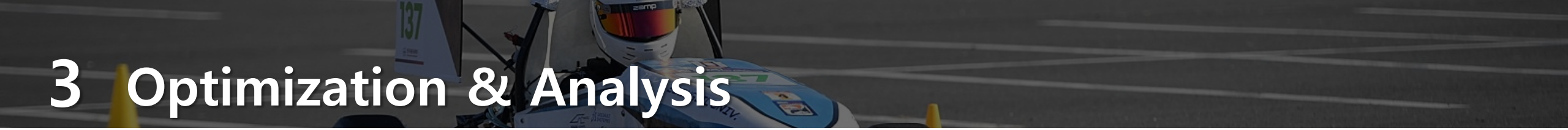
	최대 수직 하중	제동 시 최대 하중	코너링 시 최대 하중
Load vactor			
최대 Disp	0.6598 mm	0.6120 mm	0.9074 mm
	No.13616	No.13616	No.16891
최대 Stress	15.55 MPa	18.56 MPa	24.32 MPa
	No.13495	No.19363	No.6476

2 Condition

- 기존 형상 해석 결과 (2)

	최대 수직 하중	제동 시 최대 하중	코너링 시 최대 하중
Disp Fig.			
Stress Fig.			

03
Optimization & Analysis



3 Optimization & Analysis

• Shape 최적화 : Free Size 조건

Laminate THK	0.2~40mm
PLYMAN	0.2mm
Pattern Grounping	1-pin sym
CONST	PVC Ply, 20mm

▶ Laminate의 lower bound는 Ply의 최소 두께인 0.2mm이고, upper bound는 허용 최대 두께인 40mm로 설정

▶ 제작가능한 Ply 두께는 0.2mm로 설정

▶ 대칭 최적화를 진행하기 위해 No.833을 기준, No.832에 수직한 평면을 설정

▶ PVC Ply는 코어로 최적화에서 제외

Load		수직하중	제동하중	코너링하중
Constrain	Disp (mm)	0.9897	0.918	1.3611
Objective	Volume	Minimize		

▶ 총 3가지 하중 케이스에 대해서 최적화 진행

▶ 하중 별 해석 결과를 이용하여 제약조건 범위와 지점을 설정

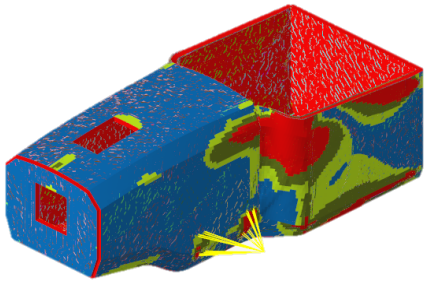
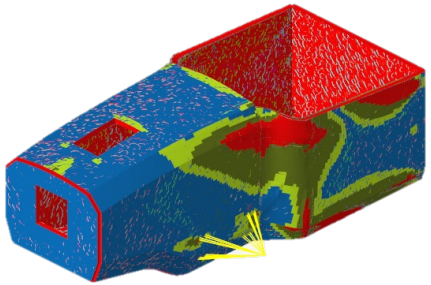
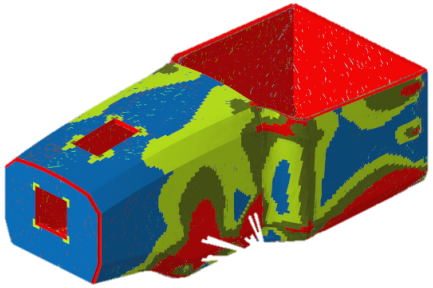
▶ 무분별한 displacement 증가를 방지하기 위해 기존 최댓값에 1.5배 값을 constrain boundary를 설정

▶ 지점은 최대 변위가 일어난 node로 설정

▶ 목적함수는 부피의 최소화로 설정

3 Optimization & Analysis

- **Shape 최적화 : Free Size 결과**

Load	수직하중	제동 하중	코너링 하중
Optimization Figure			
최적화 후 부피 (mm^3)	57341560.10	60331367.47	60331367.47
최적화 비율 (%)	-32.41	-34.75	-28.89

Free Size 최적화의 경우 평균 -32.02%의 부피 최적화

• 두께 최적화 : Size 조건

Laminate THK	0.2~40mm
PLYMAN	0.2mm
Pattern Grounping	1-pin sym
CONST	PVC Ply, 20mm

▶ Laminate의 lower bound는 Ply의 최소 두께인 0.2mm이고, upper bound는 허용 최대 두께인 40mm로 설정

▶ 제작가능한 Ply 두께는 0.2mm로 설정

▶ 대칭 최적화를 진행하기 위해 No.833을 기준, No.832에 수직한 평면을 설정

▶ PVC Ply는 코어로 최적화에서 제외

Load		수직하중	제동하중	코너링하중
Constrain	Disp(mm)	0.9897	0.918	1.3611
	Stress(MPa)	18.66	22.272	29.184
Objective	Volume	Minimize		

▶ 총 3가지 하중 케이스에 대해서 최적화 진행

▶ 하중 별 해석 결과를 이용하여 제약조건 범위와 지점을 설정

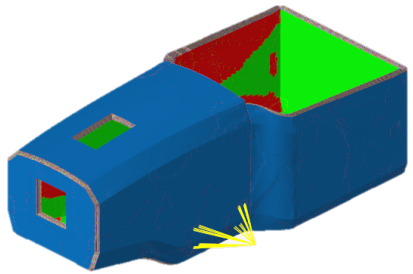
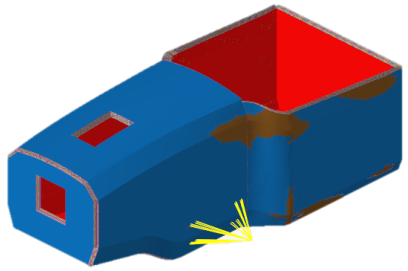
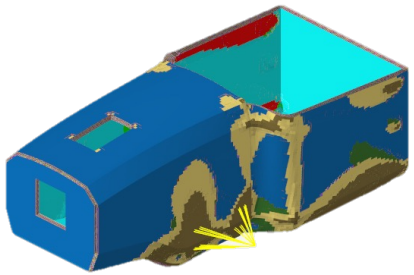
▶ 기존 disp 최댓값에 1.5배 값을 constrain boundary로 설정

▶ 응력이 과도하게 증가하는 것을 방지하기 위해 Stress 범위는 최대 응력의 1.2배 값으로 설정

▶ 목적함수는 부피의 최소화로 설정

3 Optimization & Analysis

- 두께 최적화 : Size 결과

Load	수직하중	제동 하중	코너링 하중
Optimization Figure			
최적화 후 부피 (mm^3)	73007578.52	68781407.18	59693978.82
최적화 비율 (%)	-13.95	-18.93	-29.64

Free Size 최적화의 경우 평균 -20.84%의 부피 최적화

• 정적 해석 진행 및 결과값 선별

▶ 3가지 최적화 케이스 해석 결과

		수직하중 Case	제동하중 Case	코너링하중 Case
수직 하중	disp (mm)	0.70	0.97	1.48
	stress (MPa)	18.52	27.38	46.52
제동 하중	disp (mm)	0.64	0.86	1.22
	stress (MPa)	26.26	40.11	86.58
코너링 하중	disp (mm)	1.12	1.32	2.58
	stress (MPa)	33.75	48.06	32.82
전방 롤후프	disp (mm)	20.14	20.26	37.64
	stress (GPa)	0.35	0.47	1.11
측면 하중	disp (mm)	0.89	1.00	1.49
	stress (MPa)	17.00	32.96	62.56

▶ KSAE 복합재 규정

나. 전방 롤 후프
1. 부하 하중 : Fx = 6.0kN, Fy = 5.0kN, Fz = -9.0kN
2. 하중부하점 : 전방 롤 후프 최고점
3. 최대 허용 변형 : 25mm
4. 하중부과 후 어떠한 구조물도 파괴가 일어나지 않아야 한다.

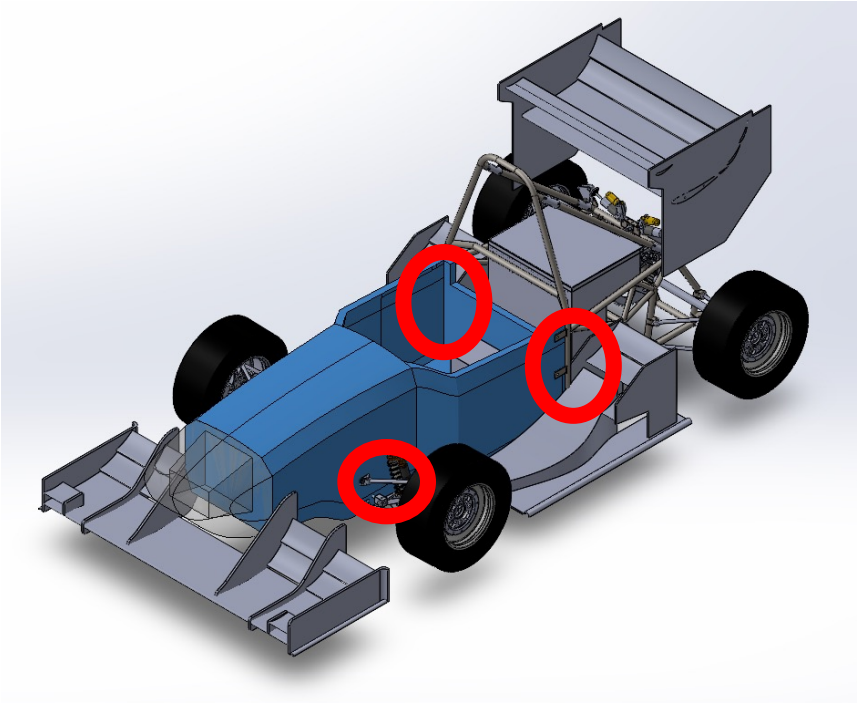
다. 측면 보호 구조
1. 부하 하중 : Fx = 0kN, Fy = 7.0kN, Fz = 0kN
2. 하중부하점 : 측면보호 구조물의 센터를 기준으로 최대 지름 250 mm의 원으로 하중 부과
3. 최대 허용 변형 : 25mm
4. 하중부과 후 어떠한 구조물도 파괴가 일어나지 않아야 한다.

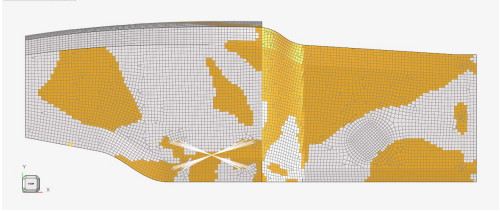
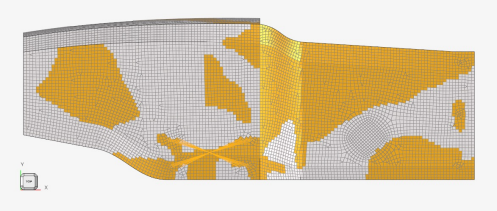
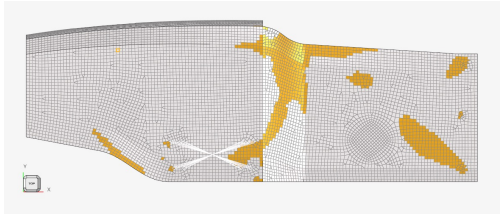
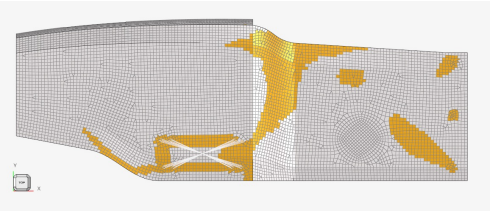
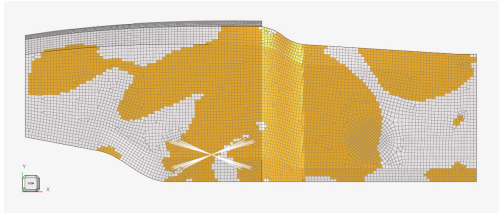
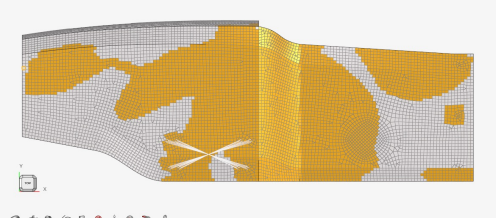
▶ 기존 형상

	최대 수직	제동	코너링	부피(mm³)
Disp (mm)	0.660	0.612	0.907	84841981.04
Stress (Mpa)	15.55	18.56	24.32	

3 Optimization & Analysis

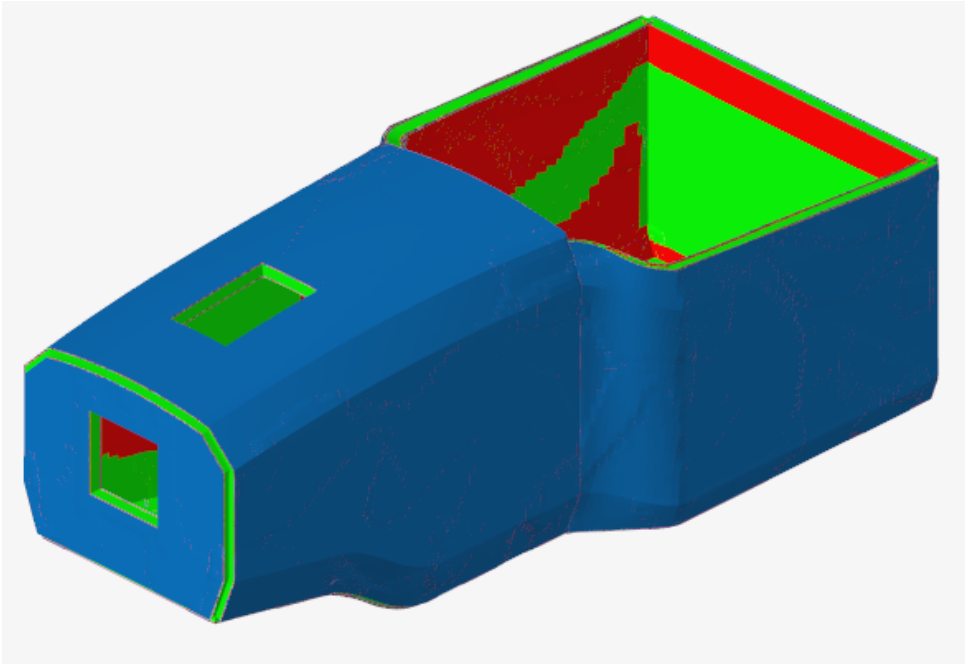
- **Ply 수정**



Ply ID	수정 전	수정 후
15200		
17400		
45200		

3 Optimization & Analysis

- **Ply 수정 결과**



	기존 형상	Re-touch 형상
부피 (mm^3)	84841981.04	73219739.97
무게 (kg)	56.3	37.28
PVC폼 제외 부피 (mm^3)	31815742.89	20176957.77
PVC폼 제외 무게 (kg)	52.06	33.02

▼

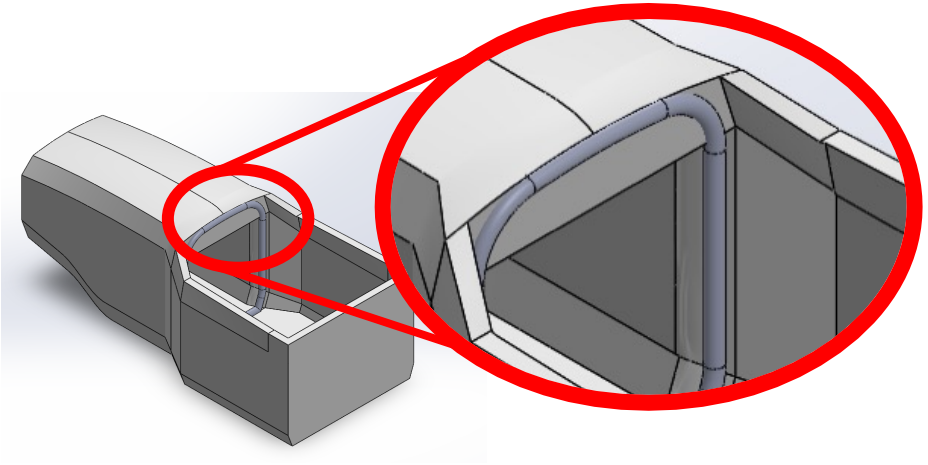
전체적인 부피는 13.7%, 질량은 33.78% 감소
CFRP의 경우 각각 36.58%, 36.57% 감소

• Ply 수정본 해석

		기존 형상	수직하중 Case	re-touch 형상
수직 하중	Disp(mm)	0.6598	0.70	0.6957
	Stress(MPa)	15.55	18.52	18.41
제동 하중	Disp(mm)	0.612	0.64	0.6333
	Stress(MPa)	18.56	26.26	24.33
코너링 하중	Disp(mm)	0.9074	1.12	1.088
	Stress(MPa)	24.32	33.75	35.01
전방 롤후프	Disp(mm)	14.5	20.14	19.99
	Stress(MPa)	56.22	350	347.1
측면 하중	Disp(mm)	0.715	0.89	0.8811
	Stress(MPa)	17.57	17.00	15.86

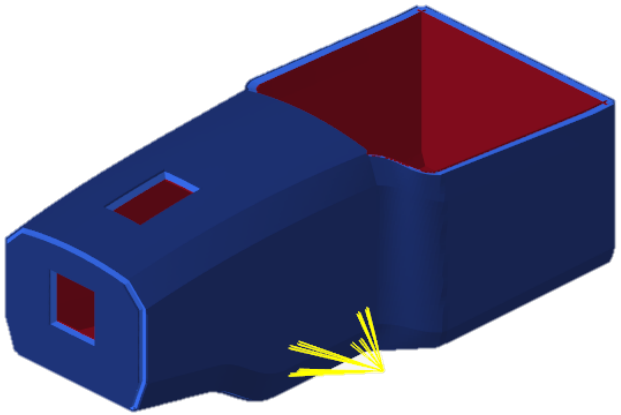
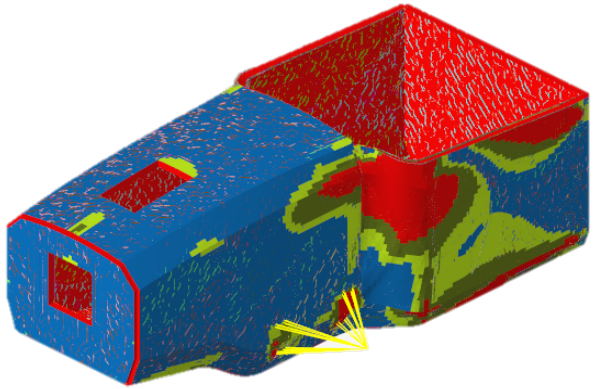
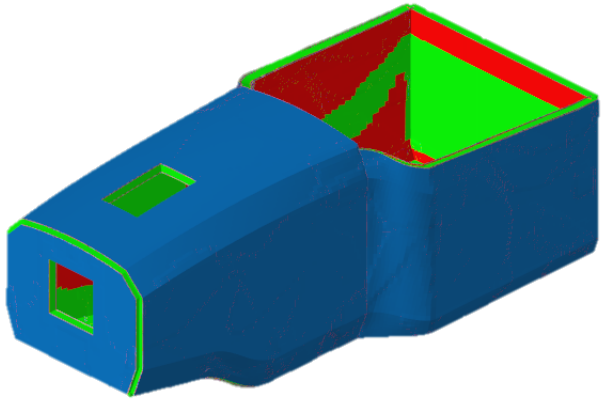
▶ 전방 롤후프 Load를. 제외한 Load에서 변형량과 응력이 평균적으로 각각 17%, 20% 증가

▶ 전방 롤후프 Load의 경우 응력이 많이 발생하여 차체에서는 파이프로 보강을 하여 강성을 확보



04
Summary

4 Summary

기존 형상	최적화 형상	수정 형상
		

CFRP 기준, 최적화 이후 36.7% 경량화 성공
평균적으로 Displacement 19%, Stress 24% 증가

Thank you

감사합니다