

카본 복합재 기반 배터리 Lower cover 최적설계

한국공학대학교 기계공학과
장찬혁

CONTENTS

01 서론

- 1.1 연구 배경
- 1.2 연구 목표
- 1.3 연구 절차

02 카본 모델 구성

- 2.1 카본 파손 기준 성립
- 2.2 PCOMPP 구성

03 배터리 팩 해석

- 3.1 모델 생성
- 3.2 알루미늄 Lower cover
- 3.3 카본 Lower cover
- 3.4 카본 최적화 Lower cover
 - 1. Free-Size
 - 2. Size
 - 3. Shuffling

04 최종 결과 비교 및 분석

- 4.1 카본 Original 다구찌 실험법
- 4.2 카본 Shuffling Optimize
- 4.3 최종 결과 비교 및 분석

01 서론

1.1 연구 배경

1.2 연구 목표

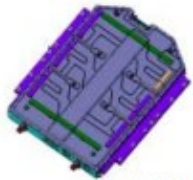
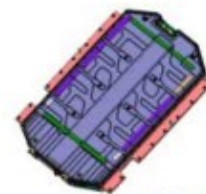
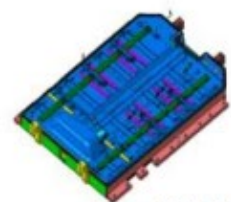
1.3 연구 절차

1.1 연구 배경

1. 친환경차-전기차 확산 배경
2. EV 배터리의 진화: 구조적 역할로 확대
3. EV 차량의 배터리의 과도한 중량

현재 전기 자동차의 경우 내연기관 대비하여 과도한 차체중량을 갖고 있어 전기 자동차의 강점인 전비를 악화시키고 있다. 예를 들어 동일 차종인 제네시스 G80의 경우 내연기관이 1830 ~ 1975kg, 전동화 모델이 2270 ~ 2290kg으로 가장 가벼운 옵션의 경우 440kg의 큰 무게 차이가 발생한다. 이 중 큰 부분이 배터리 팩 하중이 담당하고 있다.

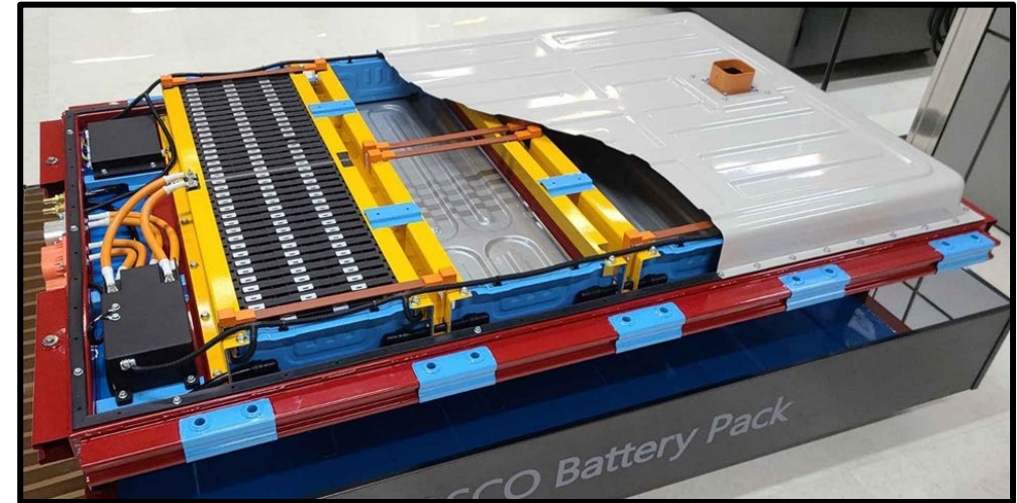
삼성증권 자동차부품 OVERWEIGHT
분석 자료

현대모비스: BSA 생산제품					
구 분	NE EV (아이오닉5)		CV (EV6) (77.4kwh, 500km) ※ NE 300마일 사양 동일	JW(GV60)/JK(GV70) (77.4kwh, 500km)	RG3 EV (G80) (87kwh, 470km)
	기본형 (58kwh, 354km)	향속형 (73kwh, 450km)			
제 품	 • 중량 370kg • 2P144S	 • 중량 458kg • 2P180S	 • 중량 480kg • 2P192S	 • 중량 480kg • 2P192S	 • 중량 540kg • 3P144S
자료: 현대모비스, 삼성증권					

1.2 연구 목표

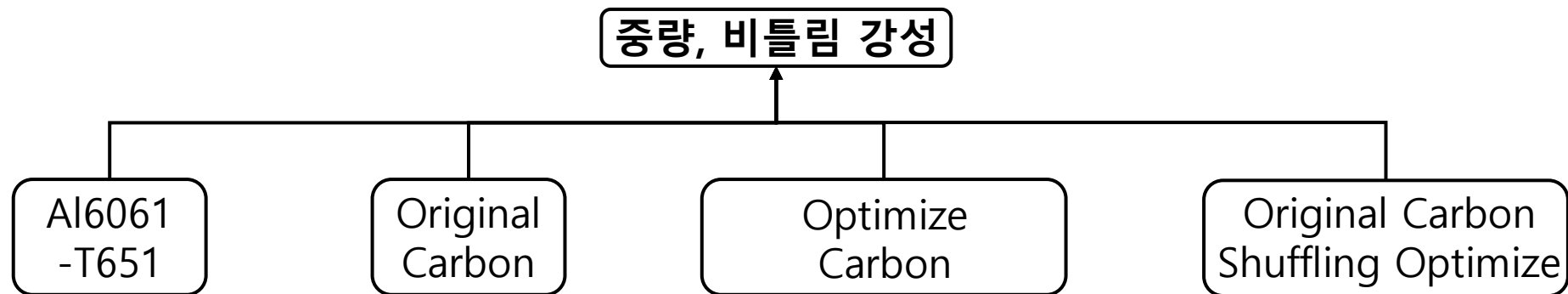
■ 핵심 판별 요인

1. 중량
2. 비틀림 강성



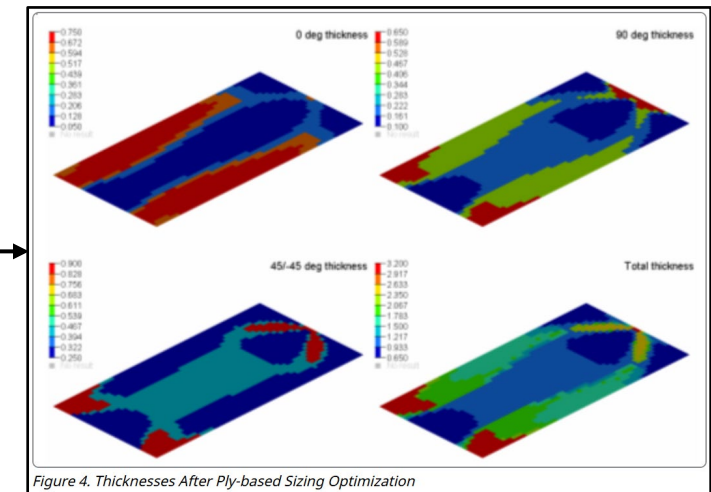
[포스코 e Autopos의 배터리팩]

동일한 형상에서 재질을 알루미늄과 카본 복합재 각각을 비교하여 중량과, 비틀림 강성을 비교한 뒤, 적층 각도 최적화, 적층 형상 최적화를 진행하여 총 4개의 옵션에 대해서 중량과 강성을 비교

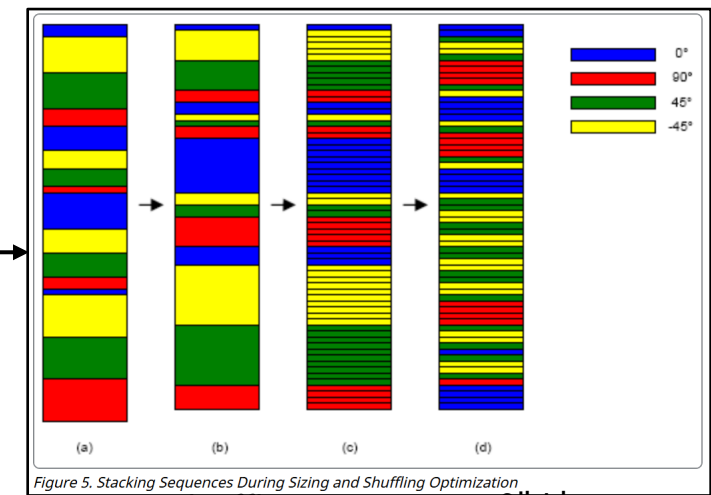


1.3 연구 절차

1. 카본 파손 기준 성립
2. PCOMPP 구성
3. 배터리 팩 모델 구성
4. 참고 논문 분석
5. 경계조건 성립
6. 해석 진행
7. 카본 Original 다구찌 실험법 적층 실험
8. 카본 Original Shuffling Optimize
9. 최종 결과 비교 및 분석



Shape Optimize 예시



Shuffling Optimize 예시

02 카본 모델 구성

2.1 카본 파손 기준 성립

2.2 PCOMPP 구성

2.1 카본 파손 기준 성립

Tsai-Wu Criterion

판별 방정식:

$$F_{index} = \left(\frac{1}{X_T} - \frac{1}{X_C} \right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_T} - \frac{1}{Y_C} \right) \sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_T X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_T Y_C} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2$$

σ_1 : 파이버 방향 응력(1축)

σ_2 : 직교 방향 응력(2축)

τ_{12} : 평면 내 전단응력

X_T, X_C : 1축 인장/압축 강도

Y_T, Y_C : 2축 인장/압축 강도

S : 평면 내 전단 강도

F_{12} : 상호작용 계수

- 판별 값(F_{index})이 1 이상일 때 복합재 PLY에서 항복 또는 파손이 발생했다고 판단.
- 이 때 F_{12} 는 σ_1, σ_2 응력의 "상호작용"이 복합재의 항복/파괴에 미치는 효과를 반영
=> 실험 값이나 산출 공식을 이용하여 근사치 계산으로 진행

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}$$

[근사치 계산식]

2.1 카본 파손 기준 성립

- F12 계수에 대해 계산해보기 위해서 이용을 고려중인 Toray T300의 물성치를 이용하여 계산을 진행 하였습니다.

Xt : 섬유 방향 인장강도 (Mpa) = 1820 Mpa
Xc : 섬유 방향 압축강도 (Mpa) = 1470 Mpa
Yt : 직교 방향 인장강도 (Mpa) = 76 Mpa
Yc : 직교 방향 압축강도 (Mpa) = 95 Mpa

F12 : -3.6×10^{-6}

COMPOSITE PROPERTIES			
PROPERTY	ENGLISH	METRIC	METHOD
Tensile Strength*	264 ksi	1,820 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus*	20 Msi	140 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain		1.26%	ASTM D-3039
Compressive Strength*	213 ksi	1,470 MPa	SACMA SRM 1R-94
Flexural Strength*	260 ksi	1,790 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus*	18 Msi	123 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	94.1 MPa	SACMA SRM 8R-94
In Plain Shear Strength	14 ksi	95 MPa	ASTM D-3518
90° Tensile Strength	11 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

*Normalized to 60% fiber volume. Cured with #2500 epoxy at 130 °C.

$$F_{12} = -k \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}$$

[k 보정 인자 적용식]

$$F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_t X_c Y_t Y_c}}$$

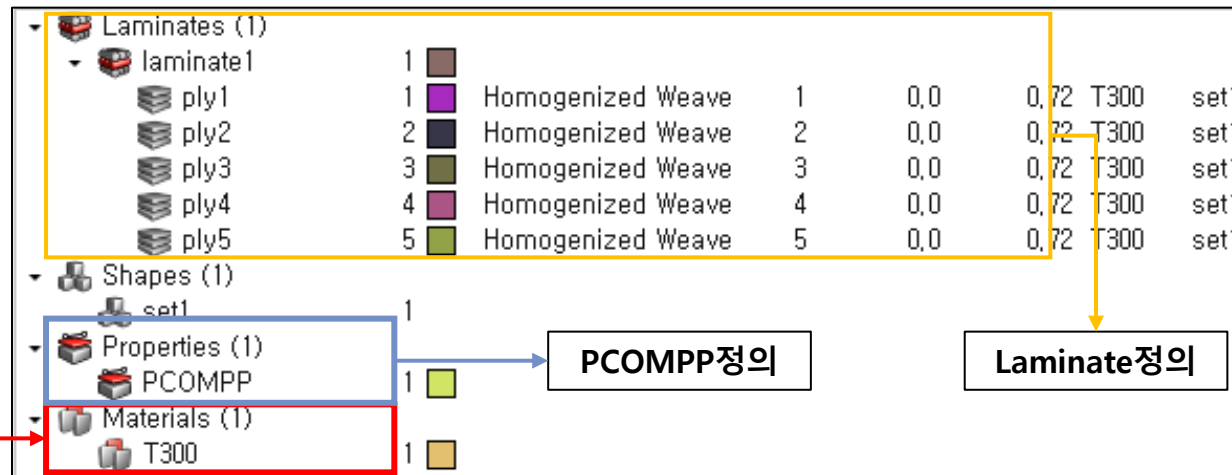
[근사치 계산식]

2.2 PCOMPP 구성

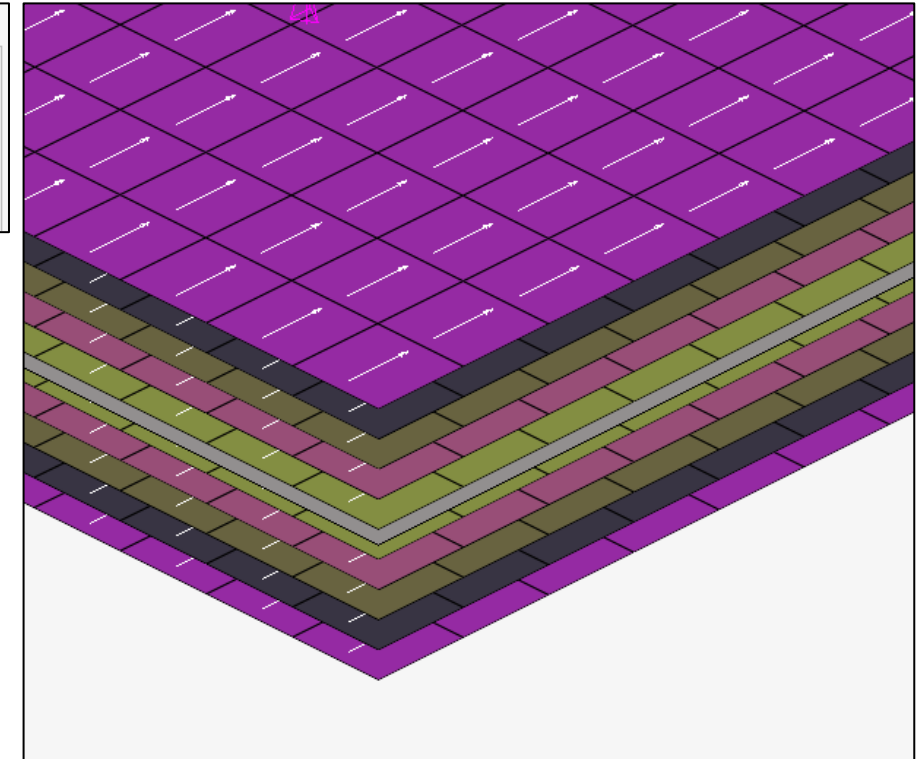
- 이전 주제에서는 적층 시퀀스, 각 플라이의 두께, 방향 등을 개별적으로 조작할 수 있도록 설계된 Ply-Based의 PCOMPP를 이용하였습니다.
- T300의 경우 Uni direction이 아닌 능직이기에 Homogenized Weave로 설정

Edit Materials								
M A T 8	MID	E1	E2	NU12	G12	G1Z	G2Z	RHO
	1	140000,0	123000,0	0,25	5800,0	5800,0	5800,0	0,001536
	A1	A2	TREF	Xt	Xc	Yt	Yc	S
				1378,0	950,0	40,0	125,0	45,0
	GE	F12	STRN					
	-3,6e-06							

[직교이방성 MAT8 카드 정의]



[Composite 정의]



03 배터리 팩 해석

3.1 모델 생성

3.2 알루미늄 Lower cover

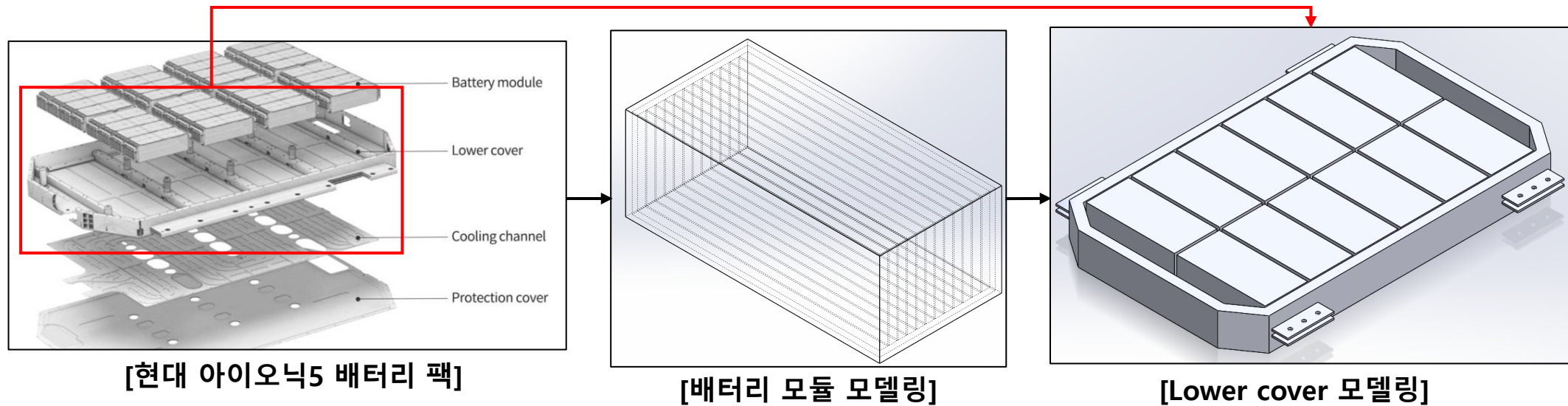
3.3 카본 Lower cover

3.4 카본 최적화 Lower cover

1. Free-Size
2. Size
3. Shuffling

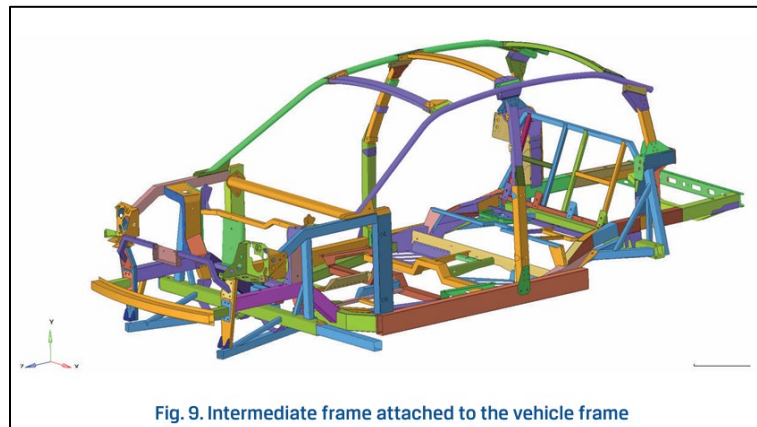
3.1 모델 생성

- 현대자동차의 경우 E-GMP 모델에 SK이노베이션이 만든 배터리 셀을 이용하며 아이오닉 5의 경우 72.6kWh 용량 기준 총 30개의 배터리 모듈, 2.4kWh 배터리 파우치 셀 12개로 구성되었습니다.
- 200Wh에 근접하는 2.75 ~ 4.2V 75Ah 파우치의 사이즈를 조사한 결과 12mm 두께, 125mm 폭, 365mm 길이 임을 알 수 있었습니다.
- 이에 따라 임의로 배터리 팩을 구성하여 진행하였습니다.

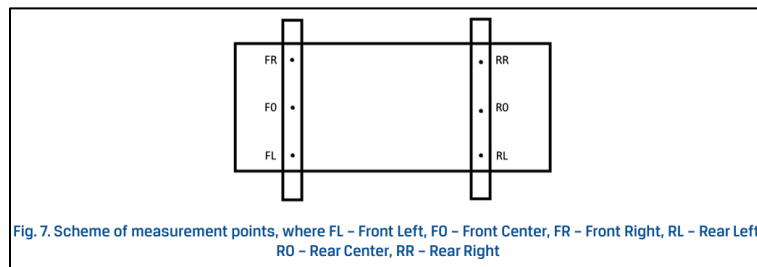


3.1 모델 생성 - 참고논문 분석

- 논문 중 Altair Hyper works를 이용하여 차량의 강성을 해석한 자료를 확인하여 해석을 진행한 방법과 구조물을 고정한 방법 등을 참고하여 고정 방법과, 하중을 선택 하였습니다.



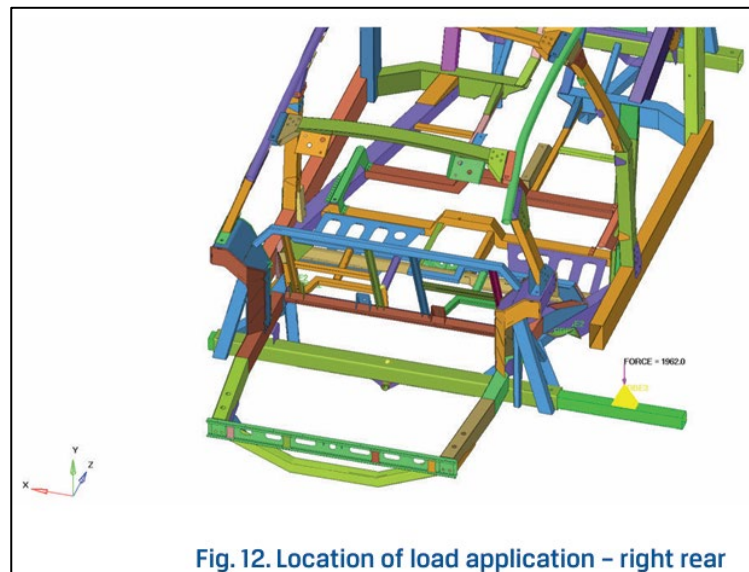
✓ 전체 모델



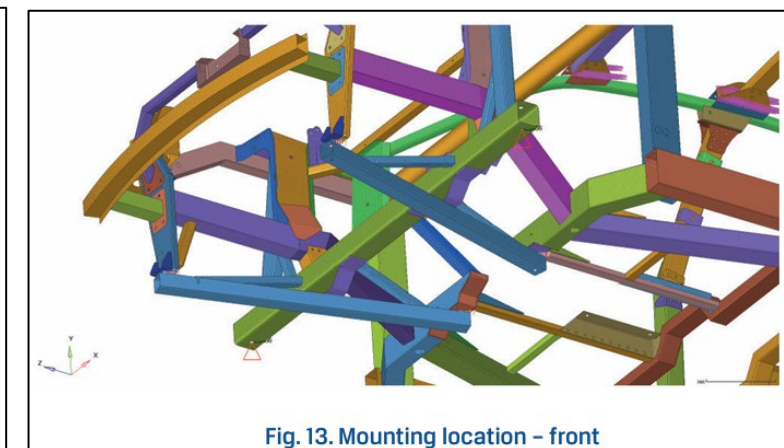
✓ 측정 포인트

The distribution of force took place through RBE3 elements in the area covering the width of the beam and the length of 100 mm. The fixing points for the front and rear rotation are shown in the figures (Figures 13-15). Load value: 1962 N (200 kg) and 2550.6 N (260 kg). These loads corresponded to the weight of the weights used during the test on the actual object. In all analysis configurations, both the method of attachment and the application and distribution of force have been defined in the same way.

✓ 하중 종류



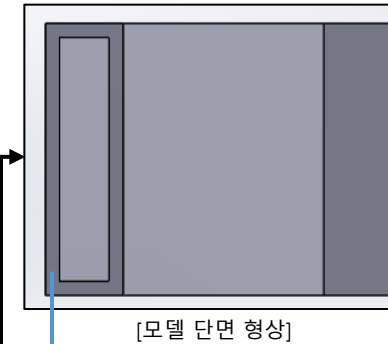
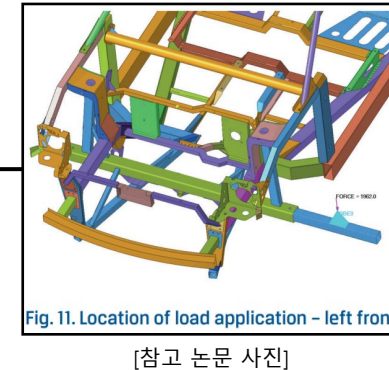
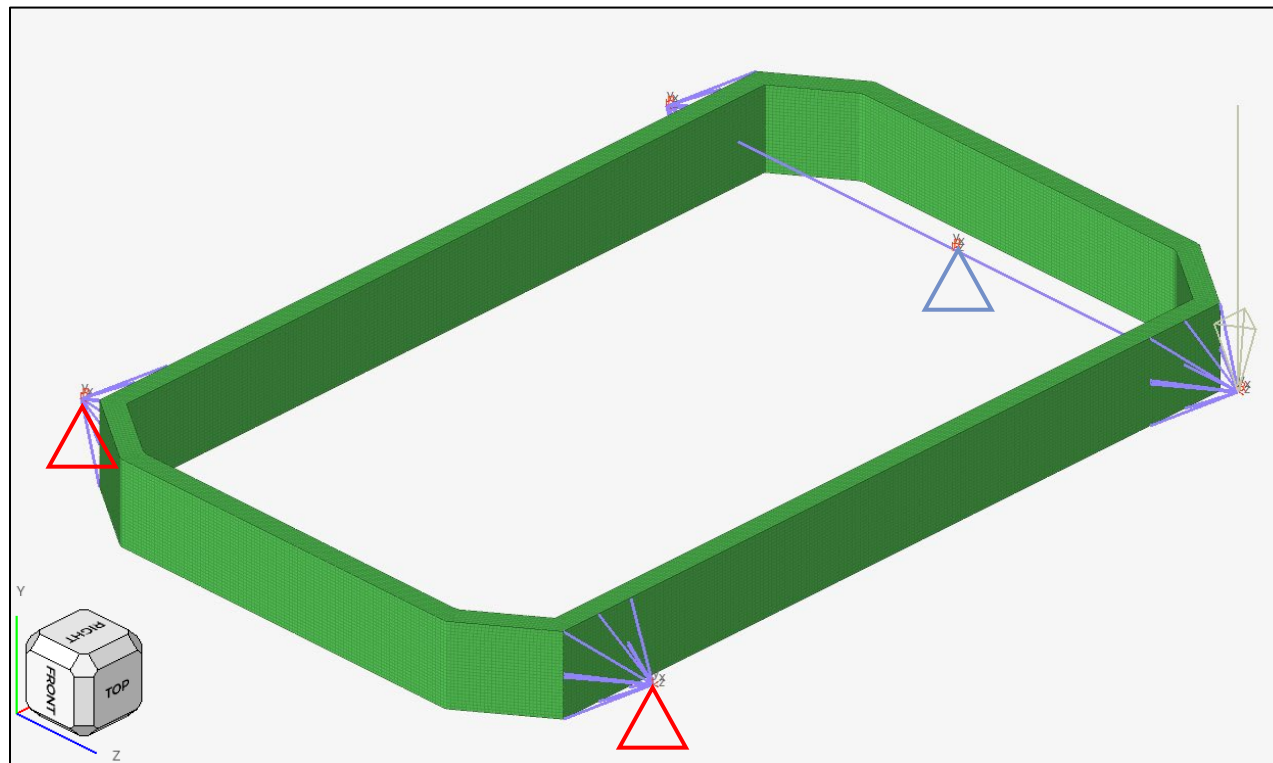
✓ 하중 인가 포인트



✓ 고정 포인트

3.1 모델 생성 - 경계조건

- 비틀림 해석의 경우 관련 예시를 통해 진행 하였으며, SPC를 이용하여 전방 2포인트와 회전 중심 축을 SPC로 고정하였습니다.



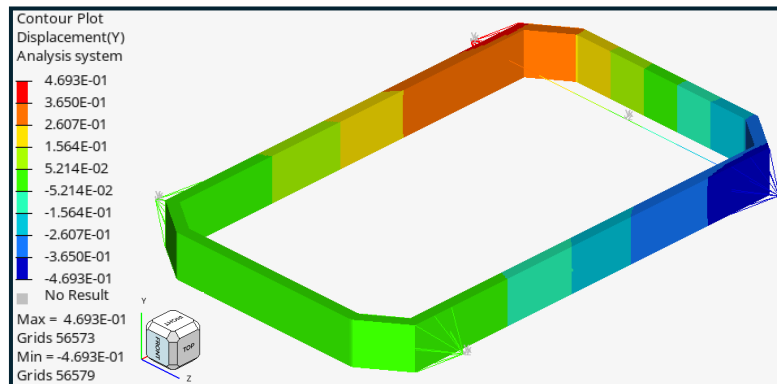
✓ 7.2T = 10 layer of carbon Fiber

Mesh type	Shell
Mesh Size	5mm
SPC	DOF 1, 2, 3, DOF 1, 2, 3, 4, 5, 6
Load	- Y 1962N
	-Y 2250.6N

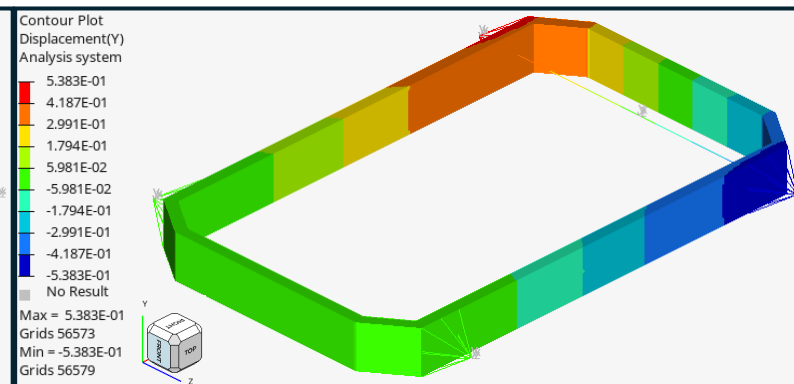
- 카본의 t 값이 0.72mm 이기에 총 10개의 Layer를 가진다는 가정으로 7.2T의 각 파이프 형태의 프레임을 생성
- Midmesh를 추출 한 뒤 Pshell, PCOMPP로 property 정의

3.2 알루미늄 Lower Cover

- Load Type 2개로 진행하며 토션 값을 계산한 결과 40900Nm/degree 근방으로 수렴하는 결과 값이 도출되었으며, 이 값을 기준으로 Carbon Lower Cover에 대한 결과 값을 비교하고자 한다.
- 토션 강성 계산 수식: $k\phi = \Delta M / \Delta\phi$
- 중량의 경우 부피를 기준으로 밀도를 곱하여 계산한 결과 26.75 kg이 도출되었다.



[1962N result]



[2250.6N result]

AL 6061		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.469	0.5383
수직 변위 [m]	0.000938	0.0010766
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.000886	0.001017
토션 강성 K (rad)	2344899.0	2343537.8
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	40926.2	40902.5

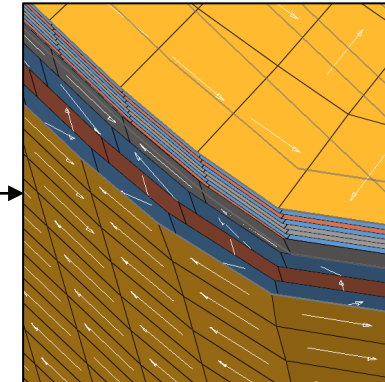
[토션 강성 계산 값]

3.3 Carbon Lower Cover Original

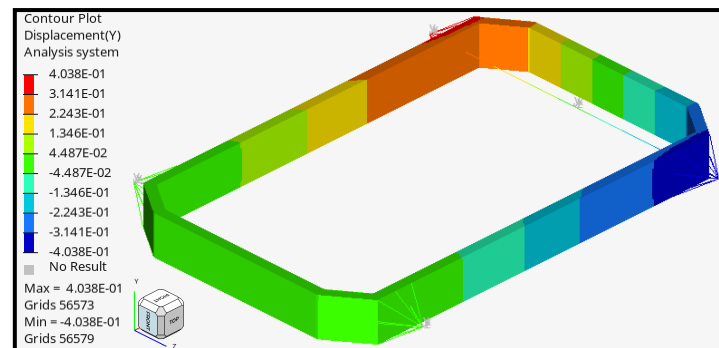
- 기존 PCOMPP 모델에서는 모두 0 Degree를 기본으로 진행 하였으나, Original 해석 이후에 Optimize를 진행하기 위해 0, 45, -45, 90를 모두 이용하여 구성하였습니다.
- Structural Mass: 15215.3g 중량: 17.44 kg => AL 6061 기준 34.8% 감량
- 토션 강성의 경우 평균 47533.1Nm/degree로 도출되었다.

laminate1	1							
ply1	1	Homogenized Weave	1	0,0	0,72	T300	set1	
ply2	2	Homogenized Weave	2	45,0	0,72	T300	set1	
ply3	3	Homogenized Weave	3	90,0	0,72	T300	set1	
ply4	4	Homogenized Weave	4	-45,0	0,72	T300	set1	
ply5	5	Homogenized Weave	5	45,0	0,72	T300	set1	

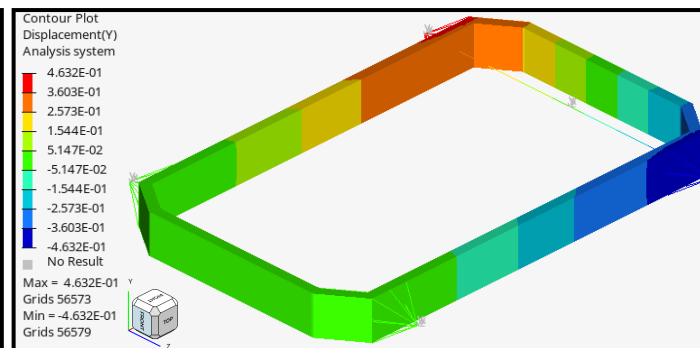
[Laminate 구성]



[Laminate 구성 사진]



[1962N result]



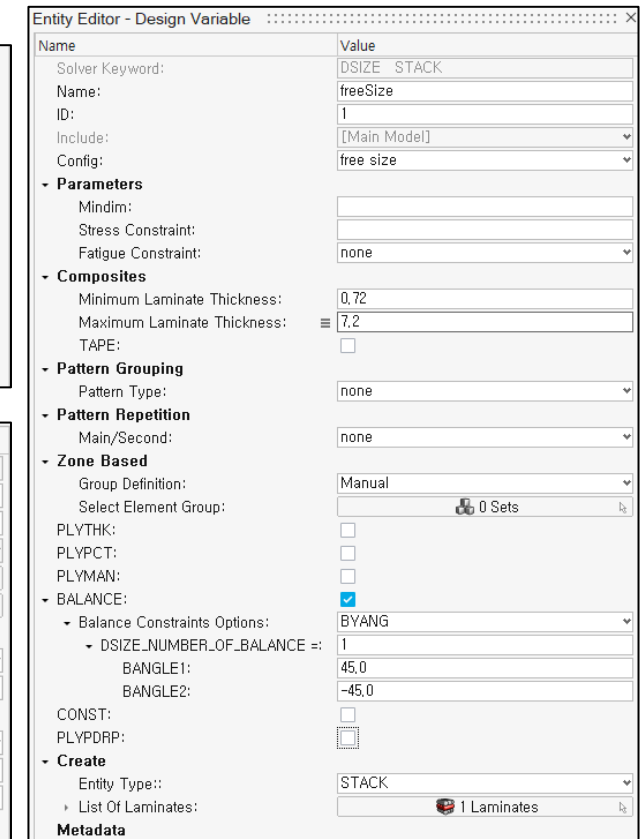
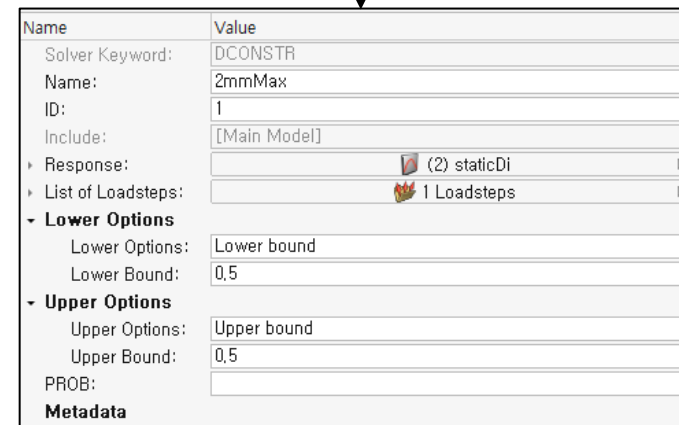
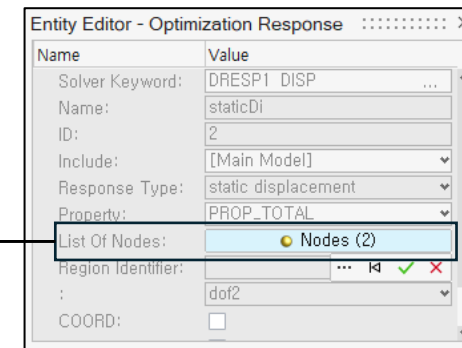
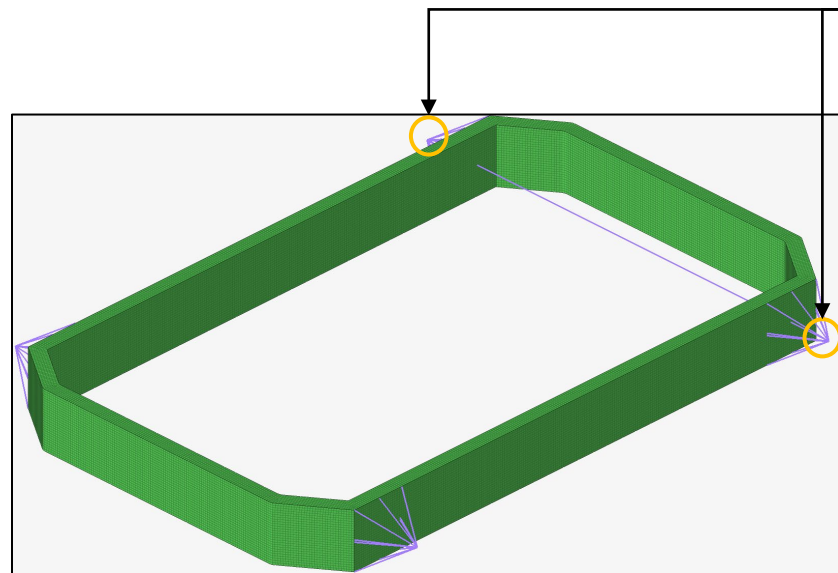
[2250.6N result]

Carbon Fiber (0, 45, 90, -45, 45)		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.40382	0.4632
수직 변위 [m]	0.00080764	0.0009264
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.000763	0.000875
토션 강성 K (rad)	2723385.6	2723502.3
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	47532.1	47534.1

[토션 강성 계산 값]

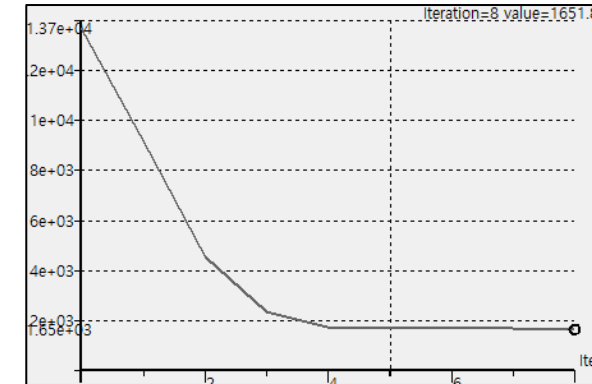
3.4 Carbon Lower Cover_free Size Optimize

- Free Size의 경우 다음과 같은 기준으로 Optimize를 진행함.
- Response를 각 변형 노드에 대해 선정하여 해당 노드의 변위를 0.5mm 변형으로 +Y, -Y 값으로 Lower & Upper Bound로 설정하여 진행하였다.
- Design Variable의 경우 Min = 1Layer, Max = 10Layers로 설정

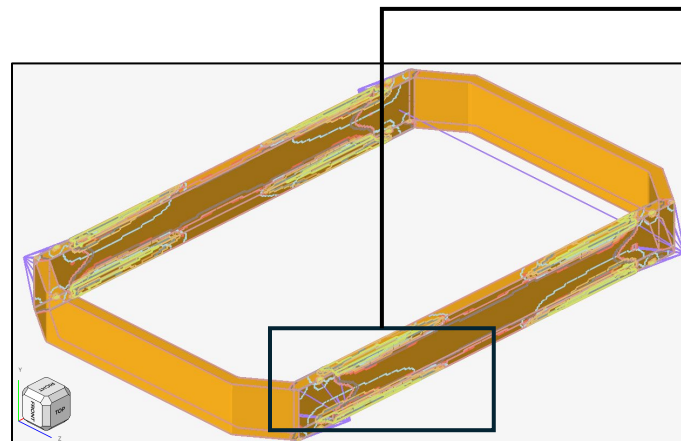


3.4 Carbon Lower Cover_free Size Optimize

- Free Size의 이후의 경우 Structural Mass:2651.79g으로 기존 15215.3g에서 82.6% 정도 중량이 감소한 것으로 알게 되었으며 이는 비중으로 계산 시 실질적인 중량은 3.03Kg으로 확인했습니다.
- 이후 토션 강성에 대해 계산한 결과 이는 Original 결과에서 65.7% 정도 감소한 결과가 도출되었다.[평균값 기준]



[수렴결과]



[적층 형상 결과]

Laminates (1)					
laminate1					
PLYS_1100	1100	Unidirectional	1	0,0	0,071182 T300 set1100
PLYS_1200	1200	Unidirectional	2	0,0	0,0120584 T300 set1200
PLYS_1300	1300	Unidirectional	3	0,0	0,0952219 T300 set1300
PLYS_1400	1400	Unidirectional	4	0,0	0,4787693 T300 set1400
PLYS_2100	2100	Unidirectional	5	45,0	0,0514313 T300 set2100
PLYS_2200	2200	Unidirectional	6	45,0	0,0202617 T300 set2200
PLYS_2300	2300	Unidirectional	7	45,0	0,00432343 T300 set2300
PLYS_2400	2400	Unidirectional	8	45,0	0,5719678 T300 set2400
PLYS_3100	3100	Unidirectional	9	90,0	0,0713123 T300 set3100
PLYS_3200	3200	Unidirectional	10	90,0	0,0102554 T300 set3200
PLYS_3300	3300	Unidirectional	11	90,0	0,0905214 T300 set3300
PLYS_3400	3400	Unidirectional	12	90,0	0,4635668 T300 set3400
PLYS_4100	4100	Unidirectional	13	-45,0	0,0514313 T300 set4100
PLYS_4200	4200	Unidirectional	14	-45,0	0,0202617 T300 set4200
PLYS_4300	4300	Unidirectional	15	-45,0	0,00432343 T300 set4300
PLYS_4400	4400	Unidirectional	16	-45,0	0,5719678 T300 set4400
PLYS_5100	5100	Unidirectional	17	0,0	0,0711637 T300 set5100
PLYS_5200	5200	Unidirectional	18	0,0	0,0120361 T300 set5200
PLYS_5300	5300	Unidirectional	19	0,0	0,0954006 T300 set5300
PLYS_5400	5400	Unidirectional	20	0,0	0,4792612 T300 set5400

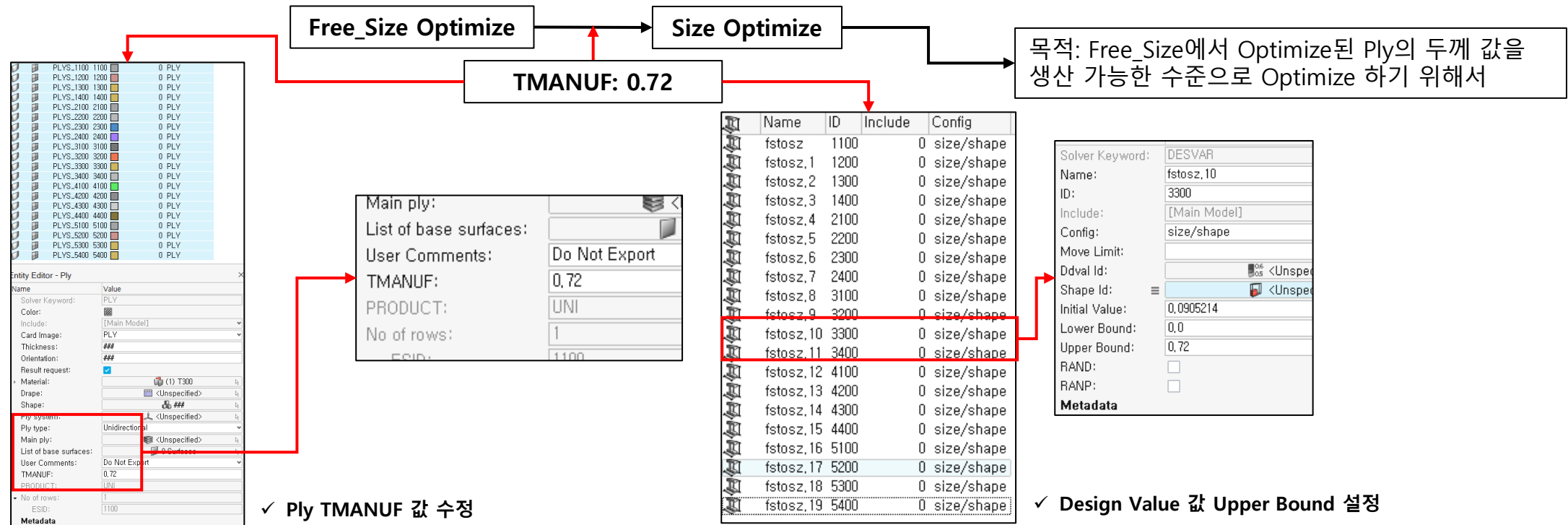
[Free Size의 laminate 결과]

Carbon Fiber (Free Sizing)		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	1.05	1.205
수직 변위 [m]	0.0021	0.00241
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.001983	0.002276
토션 강성 K (rad)	1047389.3	1046911.3
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	18280.4	18272.1

[토션 강성 계산 값]

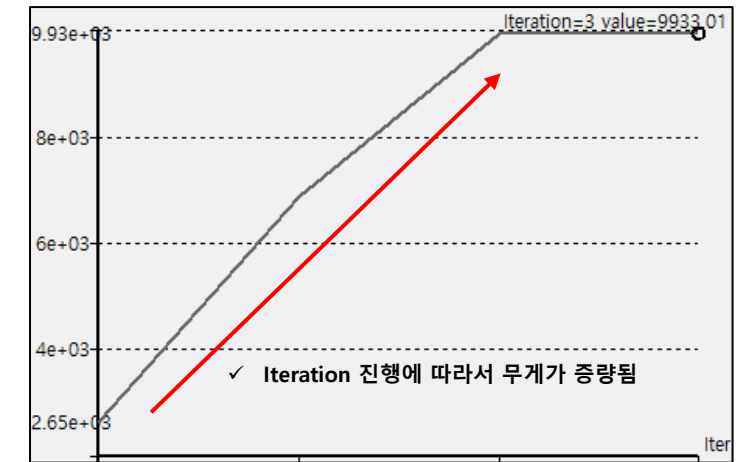
3.4 Carbon Lower Cover_Size Optimize

- Free Size의 경우 두께 결과가 제조가 불가능한 결과로 불규칙하게 도출되기 때문에 제작이 가능한 수치로 Optimize를 진행하기 위해 Hypermesh의 Size Optimize를 진행하여 제조 가능 두께로 변환하는 최적화를 진행하였다.
- 이때 제조 가능한 값을 정의하는 TMANUF 값은 기존 두께인 0.72로 설정 후 진행하였다.
- 이후 Design Value값 중 Altair에서 제시하는 가이드에 따라 Fstosz의 Upper Bound값을 0.72의 배수로 설정하였다.

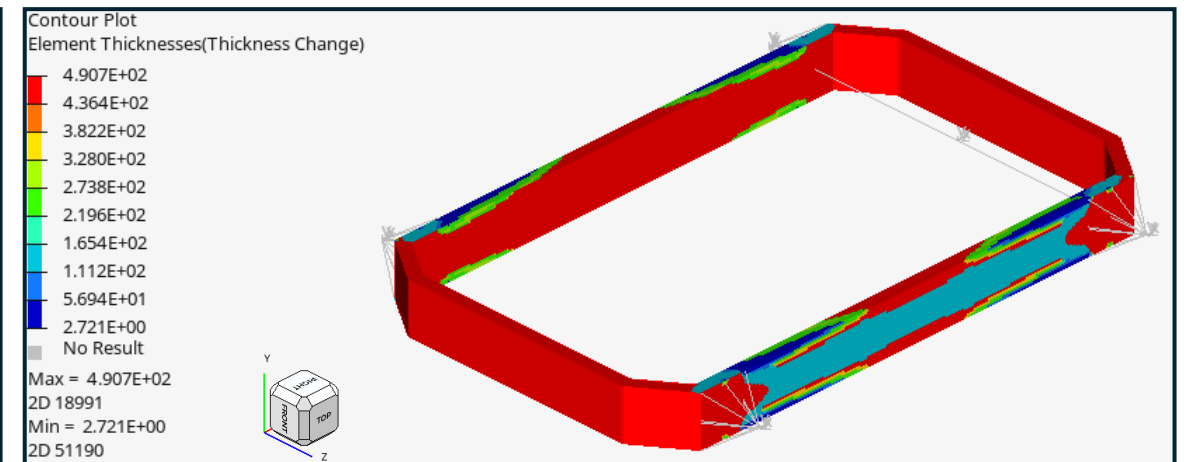
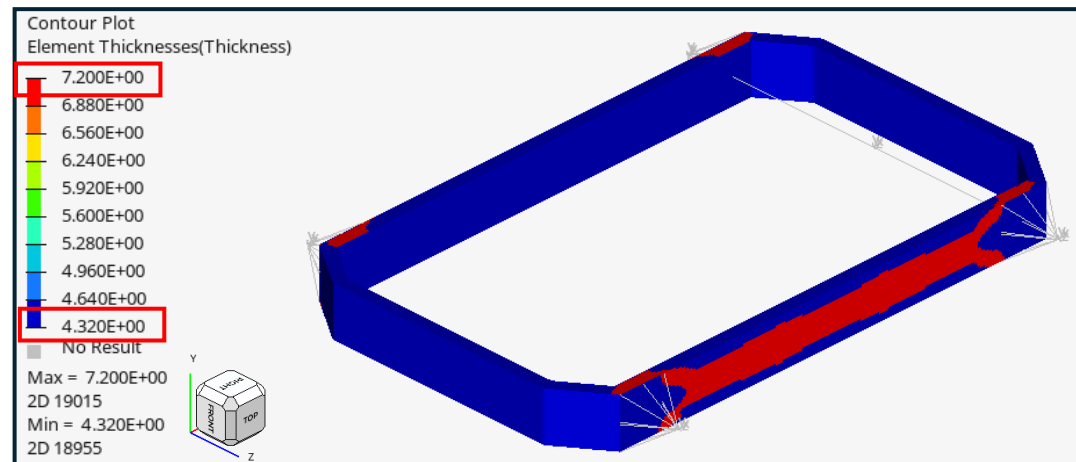


3.4 Carbon Lower Cover_Size Optimize

- 다른 Optimize의 경우 Iteration 과정에서 중량이 줄어드는 반면, Size Optimize의 경우 지정 수치까지 Ply를 재 생성 하기에 중량이 오히려 증가하는 결과가 도출되었다.
- Element Thicknesses 결과를 통해 알 수 있듯이 Max 값인 7.2는 0.72의 10 배수, Min 값은 0.72의 6배수로 Optimize 설정 값에 따라 올바르게 형성됨을 알 수 있었다.



Iteration 진행 결과



3.4 Carbon Lower Cover_Size Optimize

- Size Optimize의 결과로 도출된 Structural Mass는 9933.013g이 도출되어 Original 기준 34.71% 감소된 결과가 도출되었으며, 실질적 중량으로 계산하면 이는 11.39Kg으로 파악된다.
- 이후 Laminate결과 또한 Free Size의 Laminate의 불 규칙적인 두께 결과에서 0.72 두께로 정리가 된 것을 알 수 있었다.

Laminates (1)

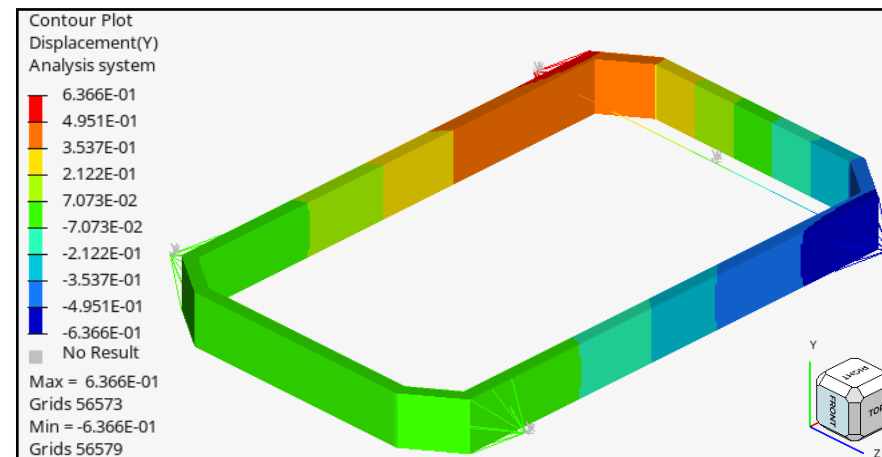
PLY	Thickness	Material	Angle	Order	Value	Set
PLYS_1100	1100	Unidirectional	1	0,0	0,071182	T300 set1100
PLYS_1200	1200	Unidirectional	2	0,0	0,0120584	T300 set1200
PLYS_1300	1300	Unidirectional	3	0,0	0,0952219	T300 set1300
PLYS_1400	1400	Unidirectional	4	0,0	0,4787693	T300 set1400
PLYS_2100	2100	Unidirectional	5	45,0	0,0514313	T300 set2100
PLYS_2200	2200	Unidirectional	6	45,0	0,0202617	T300 set2200
PLYS_2300	2300	Unidirectional	7	45,0	0,00432343	T300 set2300
PLYS_2400	2400	Unidirectional	8	45,0	0,5719678	T300 set2400
PLYS_3100	3100	Unidirectional	9	90,0	0,0713123	T300 set3100
PLYS_3200	3200	Unidirectional	10	90,0	0,0102554	T300 set3200
PLYS_3300	3300	Unidirectional	11	90,0	0,0905214	T300 set3300
PLYS_3400	3400	Unidirectional	12	90,0	0,4635668	T300 set3400
PLYS_4100	4100	Unidirectional	13	-45,0	0,0514313	T300 set4100
PLYS_4200	4200	Unidirectional	14	-45,0	0,0202617	T300 set4200
PLYS_4300	4300	Unidirectional	15	-45,0	0,00432343	T300 set4300
PLYS_4400	4400	Unidirectional	16	-45,0	0,5719678	T300 set4400
PLYS_5100	5100	Unidirectional	17	0,0	0,0711637	T300 set5100
PLYS_5200	5200	Unidirectional	18	0,0	0,0120361	T300 set5200
PLYS_5300	5300	Unidirectional	19	0,0	0,0954006	T300 set5300
PLYS_5400	5400	Unidirectional	20	0,0	0,4792612	T300 set5400

✓ Free_Size Optimize Laminate 결과

laminate1

PLY	Thickness	Material	Angle	Order	Value	Set
PLYS_1101	1101	Unidirectional	1	0,0	0,72	T300 set1100
PLYS_2101	2101	Unidirectional	2	45,0	0,72	T300 set2100
PLYS_2401	2401	Unidirectional	3	45,0	0,72	T300 set2400
PLYS_4101	4101	Unidirectional	4	-45,0	0,72	T300 set4100
PLYS_4401	4401	Unidirectional	5	-45,0	0,72	T300 set4400

✓ Size Optimize Laminate 결과



[토션 강성 해석 결과]

Carbon Fiber Size Optimize		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.6366	0.7302
수직 변위 [m]	0.0012732	0.0014604
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.001202	0.001379
토션 강성 K (rad)	1727549.3	1727645.5
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	30151.4	30153.1
AVERAGE	30152.3	

[토션 강성 계산 값]

3.4 Carbon Lower Cover_Shuffle Optimize

- 최종적으로 앞서 진행한 Free Size, Size Optimize 결과로 Shape과 적층 방향에 대한 Optimize가 진행된 결과를 바탕으로 적층 순서에 대한 Optimize를 최종적으로 진행하였다.
- 총 4개의 각도가 최대 2번 중복 배치가 가능하도록 설정 하였으며, Top층의 경우 0 degree로 고정, NO 고정 2가지 방법으로 optimize를 진행 하였다.

Entity Editor - Design Variable

Name	Value
Solver Keyword:	DSHUFFLESTACK
Name:	freeSize
ID:	1
Include:	[Main Model]
Config:	composite shuffle
Property Type:	STACK
List Of Laminates:	1 Laminates
Pairing Constraint:	☒
First Ply Orientation:	45,0
Second Ply Orientation:	-45,0
Pairing Option:	Blank
MAXSUCC:	☒
Successive Plies Options:	Specify Number
DSHUFFLE_NUMBER_OF_MAXSUCC =:	4
Data: MANGLE, ...:	
CORE:	☐
COVER:	☒
VREP:	1
NUMBER_OF_VANG =:	1
VANG:	0,0

Metadata

✓ 옵션1. 0 degree 고정

Stacking sequence for STACK 1

Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2
1101	1101	1101
2101	2101	2101
2401	4101	4101
4101	2401	2401
4401	4401	4401

Legend

45.0 degrees
0.0 degrees
-45.0 degrees

✓ 설정 조건에 따라 Top 층이 0 degree로 고정됨.

✓ 옵션2. 고정 없음

Stacking sequence for STACK 1

Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3
1101	2101	2101	2101
2101	4101	4101	4101
2401	2401	1101	1101
4101	4401	2401	2401
4401	1101	4401	4401

Legend

45.0 degrees
0.0 degrees
-45.0 degrees

✓ 최종 Shuffle 결과
[Ply를 Ud가 아닌 Homogenized Weave로 진행 했던 결과 또한 동일한 결과 도출됨]

DSHUFFLE_NUMBER_OF_MAXSUCC =

	MANGLE	MSUCC	VSUCC
1		0,0	2 1
2		45,0	2 1
3		-45,0	2 1
4		90,0	2 1

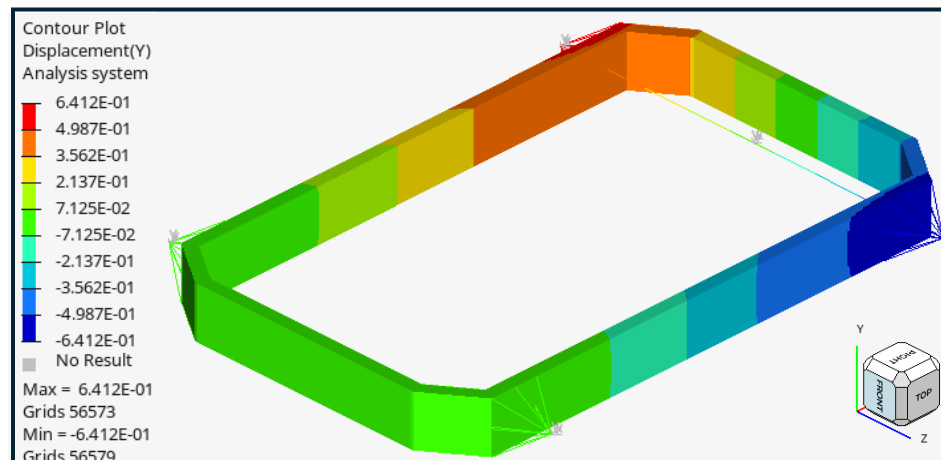
✓ Top 층 각도 고정 옵션
옵션1. 0 degree 고정
옵션2. 각도 고정 없음

3.4 Carbon Lower Cover_Shuffle Optimize

- Sequence 최적화를 진행한 2가지 옵션에 따라 torsion Stiffness를 분석한 결과 Top Layer에 대해 고정하고 해석 한 결과가 더 높은 강도를 보여 최종적으로 해당 결과를 이용하였다.
- 하지만 Shuffle Optimize 이전의 결과보다 더 낮은 토션 Torsion Stiffness가 도출되어, 기존의 Laminate 대칭 적층 방식이 아닌 일반 방식으로 전환 하여 top Layer를 고정한 적층 최적화 방식으로 재 진행하였다.

laminate1	1					
ply1	1	Unidirectional	1	0,0	0,72	T300
ply2	2	Unidirectional	2	45,0	0,72	T300
ply3	3	Unidirectional	3	-45,0	0,72	T300
ply4	4	Unidirectional	4	45,0	0,72	T300
ply5	5	Unidirectional	5	-45,0	0,72	T300

✓ 최종 Optimize 결과 반영 Laminate



Unidirectional - Top Fixed sequence		
Carbon Fiber Shuffle Optimize		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.6412	X
수직 변위 [m]	0.0012824	#VALUE!
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.001211	#VALUE!
토션 강성 K (rad)	1715155.8	#VALUE!
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	29935.1	#VALUE!

[Shuffle Optimize 결과]

Carbon Fiber Size Optimize		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.6366	0.7302
수직 변위 [m]	0.0012732	0.0014604
Force [N]	1962	2250.6
Torque	2077.37	2382.94
비틀림각 [rad]	0.001202	0.001379
토션 강성 K (rad)	1727549.3	1727645.5
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	30151.4	30153.1
AVERAGE	30152.3	

[Size Optimize 결과]

Shuffle 결과 이전보다 더 낮은 수치가 관측됨.

Stacking sequence for STACK 2					
Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	
1101	1101	1101	1101	1101	Legend 45.0 degrees 0.0 degrees -45.0 degrees
2101	2101	2101	2401	2101	
2401	4101	4101	4401	4101	
4101	2401	4403	2101	4403	
4401	4401	4405	4101	4405	
4405	4403	4402	4403	4402	
4406	4405	4404	4405	4404	
4403	4404	4406	4404	4406	
4404	4406	2401	4406	2401	
4402	4402	4401	4402	4401	

[Shuffle Optimize 재 진행 결과]

3.4 Carbon Lower Cover_Shuffle Optimize

- 이전 Shuffling 해석 결과에 대해서 재 진행한 결과를 바탕으로 Shuffle Optimize를 진행한 결과 이전 결과보다 도 더 낮은 결과가 도출되었기에 최종적으로는 Free Size의 결과가 가장 높은 강성 값을 나타냄을 알 수 있었다.
- �션 강성(Nm/degree): Size Optimize[30151.4], Shuffle Optimize1[29935.1], Shuffle Optimize2[29823.5]

Stacking sequence for STACK 2

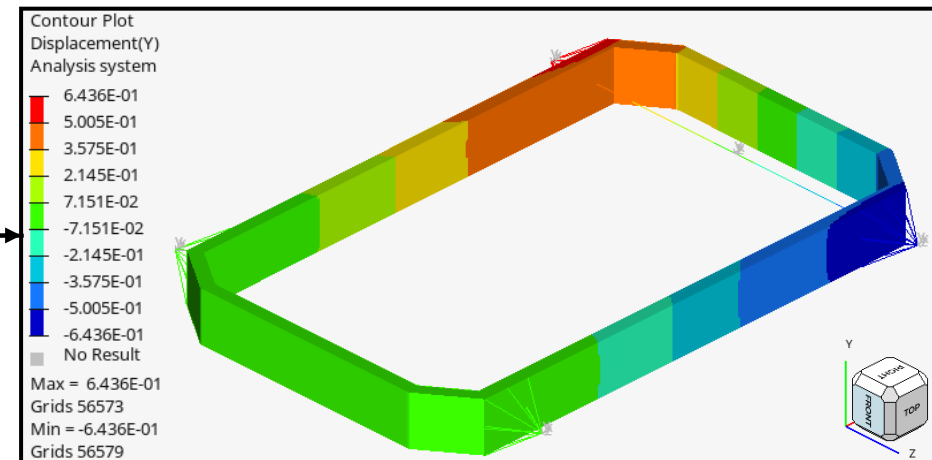
Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4
1101	1101	1101	1101	1101
2101	2101	2101	2401	2101
2401	4101	4101	4401	4101
4101	2401	4403	2101	4403
4401	4401	4405	4101	4405
4405	4403	4402	4403	4402
4406	4405	4404	4405	4404
4403	4404	4406	4404	4406
4404	4406	2401	4406	2401
4402	4402	4401	4402	4401

Legend

- 45.0 degrees
- 0.0 degrees
- 45.0 degrees

[Shuffle Optimize 재 진행 결과]

laminate2							
PLYS_1	1	Unidirectional	1	0,0	0,72	T300	set1100
PLYS_2	2	Unidirectional	2	45,0	0,72	T300	set2100
PLYS_3	3	Unidirectional	3	-45,0	0,72	T300	set4100
PLYS_4	4	Unidirectional	4	45,0	0,72	T300	set2100,1
PLYS_5	5	Unidirectional	5	-45,0	0,72	T300	set4100,1
PLYS_6	6	Unidirectional	6	0,0	0,72	T300	set1100,1
PLYS_7	7	Unidirectional	7	45,0	0,72	T300	set2400,1
PLYS_8	8	Unidirectional	8	-45,0	0,72	T300	set4400,1
PLYS_9	9	Unidirectional	9	45,0	0,72	T300	set2400
PLYS_10	10	Unidirectional	10	-45,0	0,72	T300	set4400



Unidirectional - Top Fixed sequence		
Carbon Fiber Shuffle Optimize		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.6412	0.6436
수직 변위 [m]	0.0012824	0.0012872
Force [N]	1962	1962
Torque	2077.37	2077.37
비틀림각 [rad]	0.001211	0.001216
톰 강성 K (rad)	1715155.8	1708759.9
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
톰 강성 K (Nm/degree)	29935.1	29823.5

- ✓ 재 Shuffle Optimize를 진행한 결과 기존보다 더 낮은 톰 강성이 도출되어 최종 Optimize 결과는 Size Optimize 결과를 반영
- ✓ 기존: 29935.1Nm/degree
- ✓ 재 진행: 29823.5Nm/degree

04 결론

4.1 카본 Original 다구찌 실험법 적층 실험

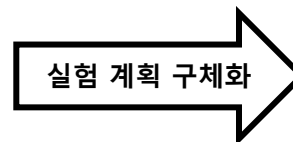
4.2 카본 Original Shuffling Optimize

4.3 최종 결과 비교 및 분석

4.1 카본 Original 다구찌 실험법 적층 실험

- 이전 Free Size, Size Optimize 이후 Shuffle을 진행 하였으나, 강성 값 증대에 유의미한 상승을 도출하기 힘들었기에 최소한의 실험으로 최대한 영향력이 있는 실험 조합을 찾도록 실험을 설계 가능한 다구찌 실험법으로 진행.
- Laminate가 대칭 기능으로 구성되어 있기에 5개의 층 => **5개의 인자**
- 각 층이 가질 수 있는 각도는 총 4개 이므로 **4수준**
- 이에 따라 **L16(4⁵)**이용 가능 => 전체 1024회에서 16회로 실험 축소 가능

요소 (층)	수준 1	수준 2	수준 3	수준 4
Layer 1	0°	-45°	45°	90°
Layer 2	0°	-45°	45°	90°
Layer 3	0°	-45°	45°	90°
Layer 4	0°	-45°	45°	90°
Layer 5	0°	-45°	45°	90°



실험 번호	Ply1 (상단)	Ply2	Ply3 (중앙)	Ply4	Ply5 (하단)
1	0°	0°	0°	0°	0°
2	0°	45°	90°	-45°	45°
3	0°	90°	-45°	45°	90°
4	0°	-45°	45°	90°	-45°
5	45°	0°	-45°	90°	45°
6	45°	45°	45°	0°	90°
7	45°	90°	90°	-45°	0°
8	45°	-45°	0°	45°	-45°
9	90°	0°	45°	-45°	90°
10	90°	45°	0°	90°	0°
11	90°	90°	-45°	45°	45°
12	90°	-45°	90°	0°	-45°
13	-45°	0°	90°	45°	-45°
14	-45°	45°	45°	90°	0°
15	-45°	90°	0°	-45°	45°
16	-45°	-45°	-45°	0°	90°

4.1 카본 Original 다구찌 실험법 적층 실험

- 계획 방법으로 실험을 진행한 결과 가장 우수한 적합 순서는 0, 90, -45, 45, 90 방법과 90, 0, 45, -45, 90 방법이 가장 우수했다.
- 해당 변형을 통해 비틀림 강성은 52964.7Nm/degree로 도출되었다.
- 추가로 Shuffle Optimize 기능을 통해 해당 조합 외에도 우수한 적층 시퀀스가 있는지 진행하여 보았다.

실험 번호	Ply1 (상단)	Ply2	Ply3 (중앙)	Ply4	Ply5 (하단)	Deformation
1	0°	0°	0°	0°	0°	0.4845
2	0°	45°	90°	-45°	45°	0.4038
3	0°	90°	-45°	45°	90°	0.3624
4	0°	-45°	45°	90°	-45°	0.4038
5	45°	0°	-45°	90°	45°	0.4038
6	45°	45°	45°	0°	90°	0.404
7	45°	90°	90°	-45°	0°	0.3625
8	45°	-45°	0°	45°	-45°	0.5194
9	90°	0°	45°	-45°	90°	0.3624
10	90°	45°	0°	90°	0°	0.3646
11	90°	90°	-45°	45°	45°	0.4075
12	90°	-45°	90°	0°	-45°	0.3627
13	-45°	0°	90°	45°	-45°	0.4039
14	-45°	45°	45°	90°	0°	0.4038
15	-45°	90°	0°	-45°	45°	0.4039
16	-45°	-45°	-45°	0°	90°	0.4042

✓ 다구찌 실험 결과

4.2 카본 Original Shuffling Optimize

- 가능한 다양한 조합을 통해 적층이 일어날 수 있도록 설정하여 Shuffle Optimize 를 진행한 결과 이전 다구찌 실험법에서 진행되지 못 하였던 조합에서 더 높은 강성이 도출되는 적층 방법을 도출할 수 있었다.

Stacking sequence for STACK 1

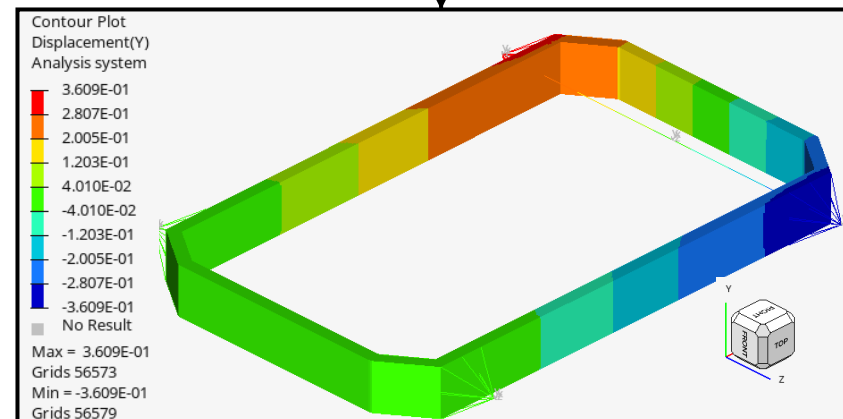
Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4
1	1	1	1	1
2	2	2	5	5
3	4	4	6	6
4	5	5	2	2
5	3	6	4	4
6	6	3	3	3
7	9	8	8	8
8	7	9	9	9
9	8	7	7	7
10	10	10	10	10

Legend

- 90.0 degrees
- 45.0 degrees
- 0.0 degrees
- 45.0 degrees

Carbon Fiber		
가로 거리 [m]	1.0588	1.0588
변위 결과 [mm]	0.3624	0.3609
수직 변위 [m]	0.000725	0.000722
Force [N]	1962	1962
Torque	2077.37	2077.37
비틀림각 [rad]	0.000685	0.000682
토션 강성 K (rad)	3034651.0	3047263.8
Nm/degree로 변환	0.017453	0.017453
토션 강성 K (Nm/degree)	52964.7	53184.8
	다구찌	Altair

Shuffle Optimize 방법을 통해 효과적으로 일부 강성 증진 확인



✓ [Iteration 4번의 적층 방법 Torsion 해석 진행 결과]
Force: 1962N

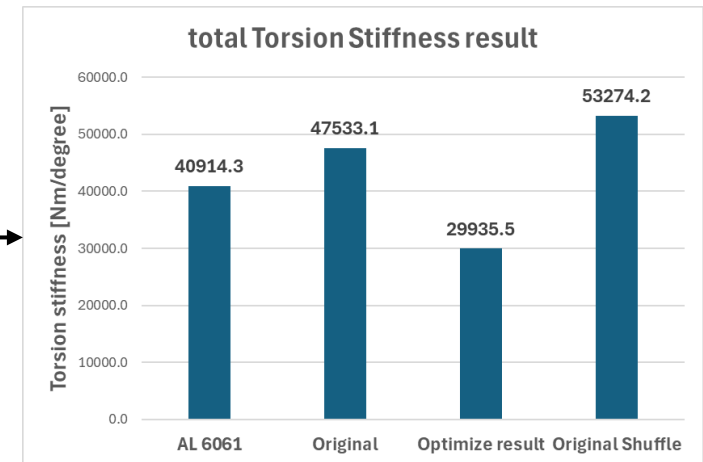
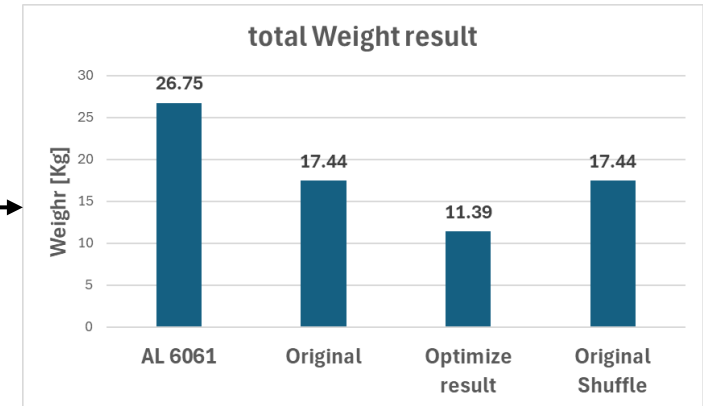
4.3 최종 결과 비교 및 분석

이번 프로젝트에서는 카본 복합재의 경량화와 강성 확보를 목표로 여러 가지 최적화 방법을 비교했습니다.

- **Free Size Optimize**는 중량을 약 82%까지 크게 줄일 수 있었지만, 그만큼 강성이 많이 감소하는 결과가 나타났습니다.
- **Size Optimize**는 실제 제도가 가능한 수준으로 두께를 조정한 방식으로, 약 35%의 중량 감소와 함께 기존보다 안정적인 강성 확보가 가능했습니다.
- **Shuffling Optimize**를 통해 적층 순서를 다양하게 바꿔보면서 강성 차이를 확인했습니다. 일부 조합에서는 기존보다 더 나은 결과도 나왔지만, 전체적으로는 **Size Optimize** 결과가 가장 균형 잡힌 성능을 보여 최종 설계로 선택했습니다.

결론적으로, 생산성을 고려하여 각 Ply 의 형상 Optimize는 진행하지 않으며, Shuffle Optimize만을 진행하였을 때 아이오닉 5기준 중량 부분은 34.8% 감량, Torsion Stiffness의 경우 30.2% 정도 증가가 가능한 것으로 확인되었습니다.

Homogenized Weave 기준					
	type	AL 6061	Original HW	Optimize result HW	Original Shuffle HW
Torsion stiffness [Nm/degree]	Force 1962 N	40926.2	47532.1	29935.1	53184.8
	Force 2250.6 N	40902.5	47534.1	29935.8	53363.5
	Average	40914.3	47533.1	29935.5	53274.2
Weight [kg]		26.75	17.44	11.39	17.44



감사합니다

이용 논문

Li, S., Sitnikova, E., Liang, Y., & Kaddour, A.-S. (2020). The Tsai-Wu Failure Criterion Rationalised in the Context of UD Composites. Faculty of Engineering, University of Nottingham, UK; QinetiQ, UK.

Podkowski, K., Małczuk, A., Stasiak, A., & Pawlak, M., "Testing of the torsional stiffness of the passenger car frame and its validation by means of finite element analysis," The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji, Vol. 85, No. 3, pp. 83–94, 2019.