

2022 대학생 자작자동차대회 알테어 최적설계상 보고서



학교명	동국대학교	팀명	Team KART
차량번호	132	팀장	양진우
차량	이름	De-Drift (DKT-22)	
	제원	전장 3119.5 mm × 전폭 1380.6 mm × 전고 1202.7 mm (무게 260 kg)	

상기 참가팀은 2022 대학생 자작자동차대회의 알테어 최적설계상 부문 보고서를 다음과 같이 제출합니다.

2022년 8월 12일

대학생 자작자동차대회 조직위원회 귀중

- 설계 보고서 작성법은 아래와 같습니다.

- 1) 가급적 어떤 기술(방법)을 적용 했느냐가 아니라 어떤 이유로 CAE를 적용, 활용했는가 서술
- 2) 가급적 어떤 부품을 적용 했느냐가 아니라 어떤 이유로 부품을 적용했는가 서술
- 3) 감성적 글쓰기가 아니라 정량적 결과를 서술 (사진, 계산식, 해석결과, 그래프 등)
- 4) 과거 차와 비교해 개선 또는 혁신 내용 (과거차를 무시하는 발언은 금물)
- 5) 해당사항 또는 강조할 내용 중심 위주로 작성

- 새시 : 프레임, 현가장치, 제동장치, 조향장치 등
- 동력계 : 엔진(흡배기), 모터-배터리, 구동계, 윤활-냉각 등
- 인체 공학 : 변속기, 시트, 페달, 스위치 접근성, 계기판 시인성 등
- 공기역학 : 바디, 디퓨저, 윙 등

6) 작성 순서 (총 4page 이하)

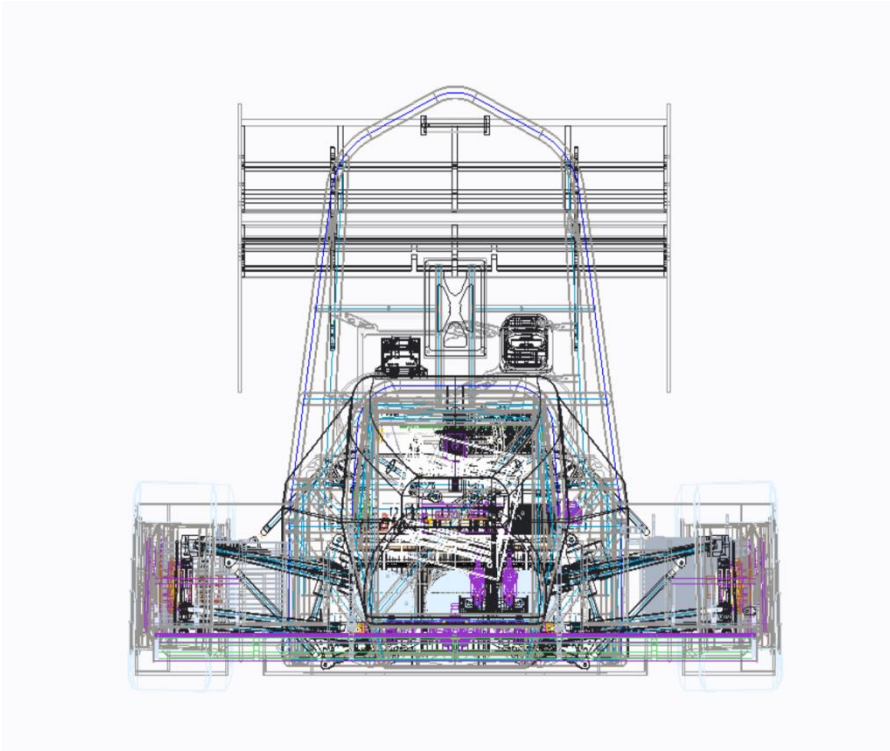
- 요약 / 설계 / 해석 / 제작 / 검증, Test 결과 / 원가절감 사례(3건이하) / 결론 / 참고 문헌

- 본 문서는 8/12 (금)까지 아래 메일로 제출 바랍니다.

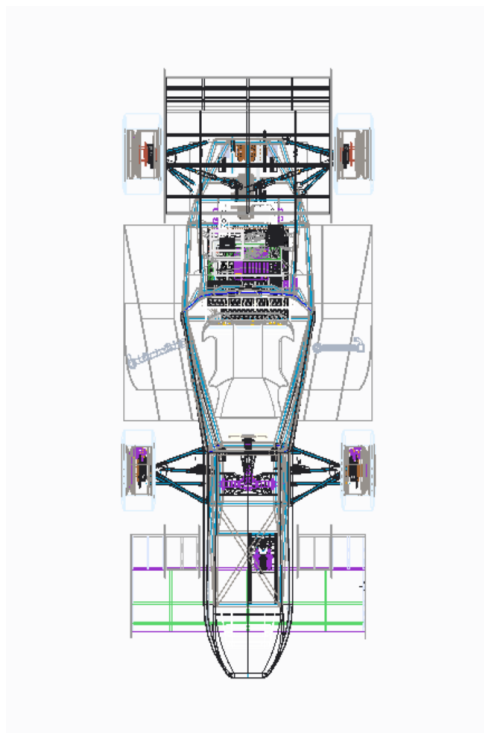
- 제출 메일 : LAB@altair.co.kr

1. 도면

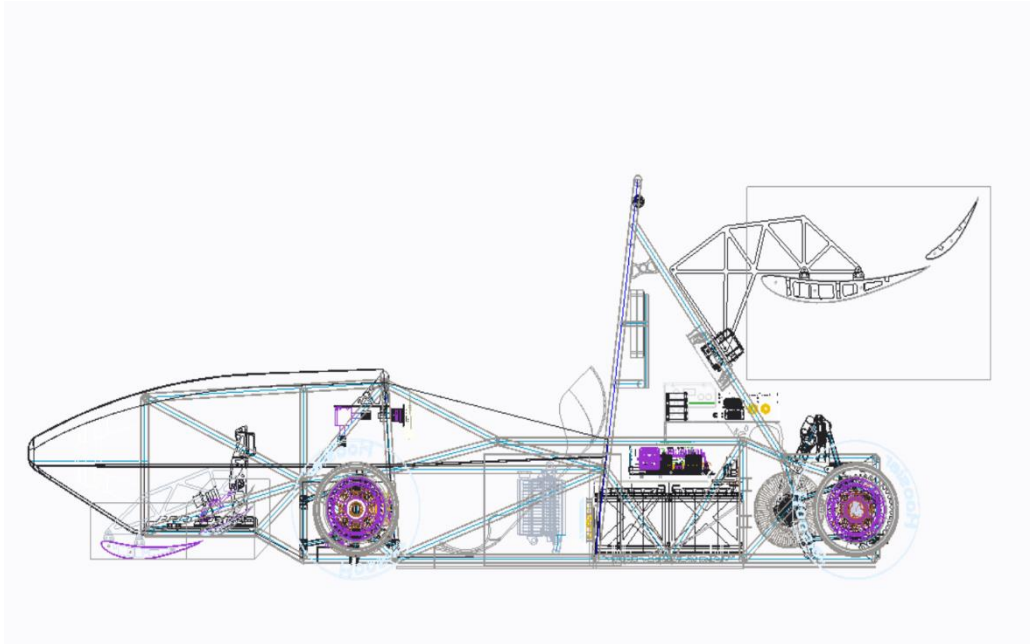
1) 정면도



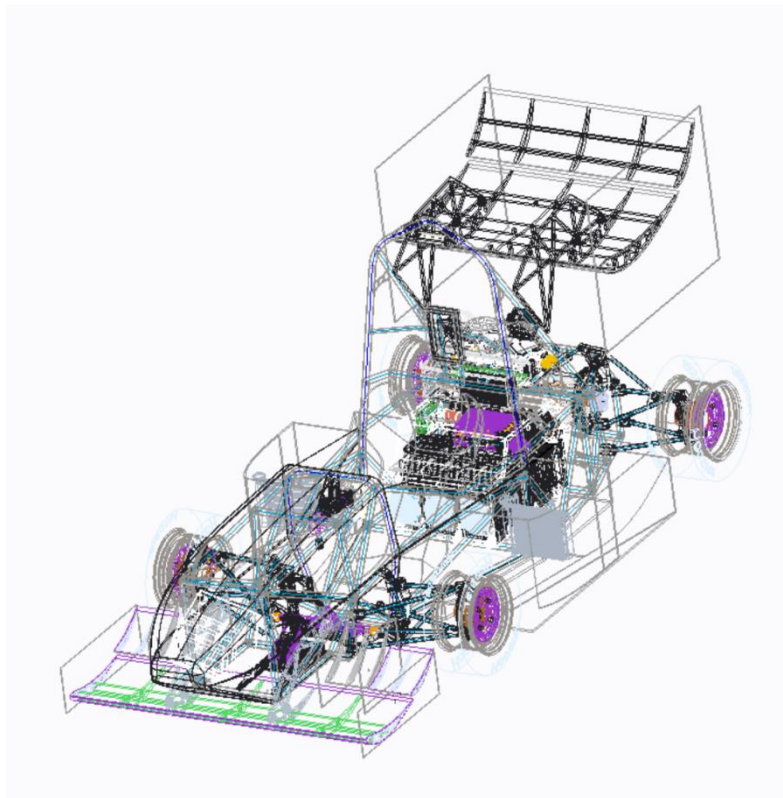
2) 평면도



3) 측면도



4) Isometric view





Inspire 를 이용한 구동계 마운트 부품 설계 및 Hyperworks 를 이용한 Student Formula 에어로 풀 패키징 설계

양진우, 이영훈, 김찬우, 성해민, 김혜민, 이휘호, 정경수, 이준용, 정성범, 허태혁, 김유탉, 장민우, 신호철,
이수민, 김석현, 박정요, 신유림, 심선우, 오예림, 정치훈, 홍재현, 박병규, 박수민, 박주언, 손준호, 위수영,
조용은, 조혜찬, 조희주, 최하람

동국대학교 Team KART

요약

본 팀은 2021년 까지 FCC社의 F.C.C. TRAC LSD의 차동기어를 사용해왔다. 수년간의 사용으로 인하여 내부 부품이 마모되어 코너에서의 구동배분에 문제가 있음을 발견하였다. 따라서, 본 팀은 차동기어 교체의 필요성을 느껴, EMRAX 228 모터에 적합한 차동기어를 선정하였다.

본 팀이 선정한 차동기어는 Drexler社의 차동기어로 다관 클러치 형식의 차동기어이다. 2.0kg으로 FCC TRAC LSD에 비해 풀 패키징 무게가 가벼우며, 차동기어가 수용할 수 있는 최대 토크는 1200 Nm, 작동 프리로드는 45~50 Nm이다. 베어링 마운트 거리는 120mm인 V1 모델을 선정하였다.

차동기어를 새로 적용함에 따라, 구동계를 마운트하는 부품들의 재설계가 필요했다. Creo Parametric 및 Solidworks 3D CAD를 이용하여 Dummy 모델링을 진행하고, 부품의 경량화를 위하여 Altair Inspire를 이용하여 위상최적화를 진행하였다. 추가적으로 SimSolid 해석 프로그램을 이용하여 Von Mises 응력 분포 및 안전률 분포를 확인하고 테스트 주행 후 변형 확인 등 검증하는 과정을 가졌다.

또한 본 팀에서는 지난 수년간 KSAE 대회를 참가하기 위해 formula 차량을 설계 및 제작해오면서 마침내 300V에 버금가는 294V로 고출력 차량에 도달할 수 있었다. 그에 따라 128V를 위한 차량의 프레임 바디의 한계성을 발견하고, 앞으로 고출력을 견디기 위한 발전된 하드웨어 시스템의 필요성을 느꼈다. 기존에서 하드웨어의 극명한 발전 사례를 연구한 결과, 무게 대비 극한의 효율성을 갖는 풀 패키징의 에어로 시스템을 도입하게 되었다. 첫 에어로 차량 시도에 따른 최우선 목표는 첫 제작의 어려움에 대비하기 위해 기본적인 형상을 주로 채택하여 유의미한 다운포스 성능 확인이다. 이후, 내년 차량부터 기존 데이터를 기반으로 다운포스 성능을 고도화하는 것을 차선의 목표로 두었다. 유동해석 툴은 한국알테어社에서 제공받은 Hyperworks CFD를 사용하였고, 그로부터 얻은 차량의 다운포스는 시속 80km/h 기준 227N이며 제작 후 파츠 총 중량은 15.1kg으로 무게대비 다운포스 성능을 확인하였다.

1. 설계

[1] 구동계 마운트 부품

(1) 경계조건 및 초기모델 구성

구동계 구성에 앞서, 모터 구동축의 소기어와 차동기어에 장착되는 대기어의 기어비는 4.0 으로 설정하였다. 기어비를 4.0 으로 설계함에 따라, 소기어의 직경은 약 61.53mm, 대기어의 직경은 약 264.59mm 로 설계되었다. 소기어에서 체인 접촉각을 120 도 이상 확보하기 위해서는 215mm 이상의 기어 간 거리가 요구된다.

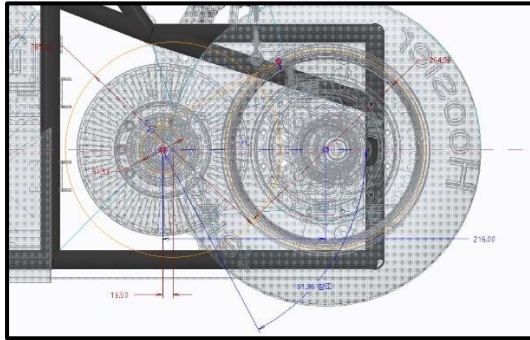


Fig. 1 구동계 경계조건(체인 톨립각 등)

체인 장력은 모터의 최대 토크와 소기어의 크기로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (\text{Motor Max. Torque}) &= (\text{Minimum Sprocket Dia.}) \cdot (\text{Chain Tension}) \\
 185 \text{ Nm} &= 0.05138 \text{ m} \cdot (\text{Chain Tension}) \\
 \text{Chain Tension} &= 3600 \text{ N}
 \end{aligned}$$

구동계의 Force 구성에서 X축 요소의 힘만 계산하였을 때, 3397N으로 확인하였다. 또, 대기어의 위상최적화를 진행하기 위하여 체인에 의하여 기어의 각 Tooth 에 가해지는 힘을 알아야 한다.

$$F_{\text{tooth}} = \frac{F_{\text{chain tension}}}{n_{\text{meshed}}} = \frac{3600 \text{ N}}{25} = 144 \text{ N}$$

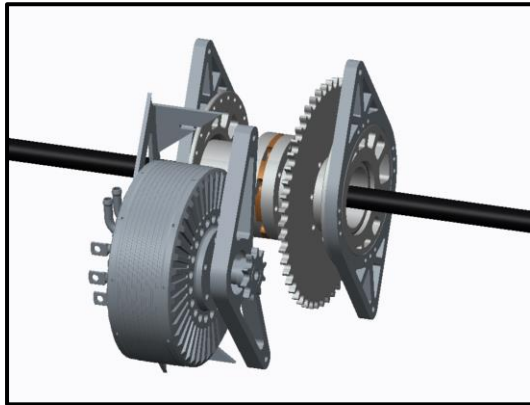


Fig. 2 2021 Powertrain 및 체인 장력조절 장치

Emrax 228 모터와 Drexler LSD 를 구동계에서 이용함에 따라 체인 드라이브 방식을 이용하였다. 체인을 이용하며, 체인 장력 조절장치는 여러 방식이 존재하지만, Fig. 2 와 같이 기존에 이용했던 편심 조절을 통해 해결하기로 하였다. 체인 장력조절은 X 축 기준 최대 30mm 이동 가능하다.

* 팀장 양진우, yangjw98@gmail.com

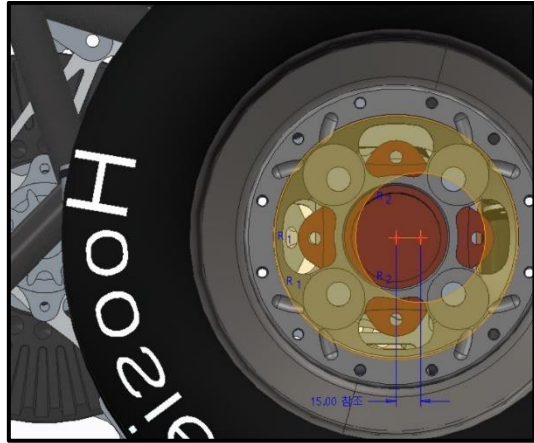


Fig. 3 체인 장력조절 이동 범위

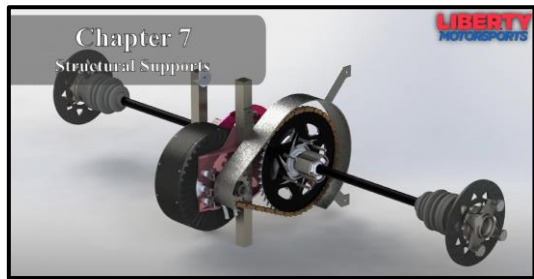


Fig. 4 Youtube(How to Design an Electric Powertrain(FSAB)), 구동계 구성 예시

2021 년까지 FCC TRAC LSD 를 이용하며, 크게 3 가지의 단점이 존재하였다. 모터 및 LSD 마운트의 높은 무게, 각 부품의 탈착 상황에서의 낮은 정비성, 프레임 및 브라켓 제작 단계에서 체인을 모터의 소기어와 LSD 의 대기어의 평행축에 평행길기에서의 어려움이 존재하였다. 이와 같은 어려움들을 보완하기 위해 Fig. 4 와 같이 모터와 LSD 를 같은 마운트에 위치시킴으로써 평행길기에 대한 어려움과 낮은 정비성을 동시에 해결하였다.

다음과 같은 과정을 통하여 모터와 LSD 의 편심조절기가 장착되는 각 마운트들의 Dummy 모형을 만들었다. Dummy 모형의 3D CAD Assembly 를 통하여 각 부품 간의 간섭이 없음을 확인하였다.

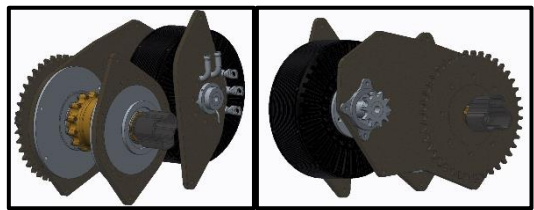


Fig. 5, 6 3D CAD Dummy Assembly

(2) 재료 선정

위상최적화에 앞서, 워터젯/레이저커팅/CNC 가공을 통해 제작하면 SS400, AL6061-O/T6, AL7075-O/T6 로 재료가 한정되었다.

	SS400	AL6061	AL6061-T6	AL7075	AL7075-T6
Density [g/cm ³]	7.85	2.70	2.70	2.81	2.81
Young's Modulus [GPa]	206.0	68.9	68.9	71.7	71.7
Shear Modulus [Gpa]	79.0	26.0	26.0	26.9	26.9
Tensile Yield Strength [Mpa]	245	55.2	276	103-145	480
Tensile Ultimate Strength [Mpa]	400-510	124	310	228-276	560

Table. 1 재료선정

Table. 1에서와 같이 AL6061-T6 및 AL7075-T6가 상대적으로 낮은 밀도에도 높은 Yield Strength 및 Ultimate Strength 분포를 보여주었다. 따라서, 모터 마운트, 편심조

절기(좌, 우)는 AL6061-T6로 재료선정을 진행하고, 대기어 마운트와 대기어는 AL7075-T6로 재료선정하며, LSD 및 모터 마운트와 LSD 마운트는 AL6061로 재료선정하였다.

(3) 위상최적화 (Topology Optimization)

구동계 부품에서의 로드는 크게 부품 모터와 LSD 의 자중 및 체인 장력이다. 이에 따라, LSD 마운트, 모터 마운트, LSD 및 모터 마운트는 자중 및 체인장력을 로드케이스로 적용하였다. 또, 체인 장력 조절장치 및 대기어, 대기어 마운트는 각각 다른 각도로 체인장력이 작용하기 때문에 로드케이스를 다양하게 적용하였다. 아래의 Figure 는 각 부품의 터미 및 위상최적화 후 실차량에 적용된 부품 형상이다.

위상최적화 조건은 강성최대화 및 총 디자인 체적의 목표 절량 25%이다.

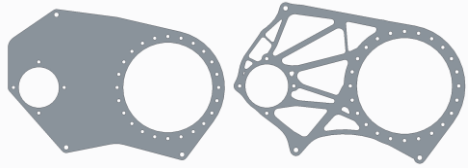


Fig. 7,8 LSD 및 모터 마운트 터미/최적화 형상

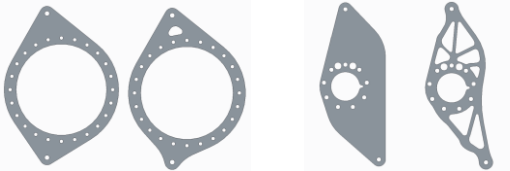


Fig. 9,10 LSD마운트 터미/최적화 형상 Fig. 11, 12 모터 마운트 터미/최적화 형상

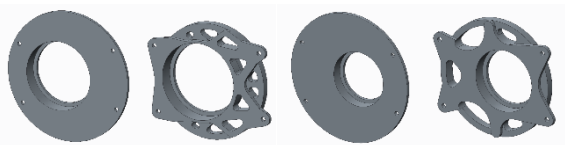


Fig. 13, 14 편심조절기(좌) 터미/최적화 형상 Fig. 15, 16 편심조절기(우) 터미/최적화 형상

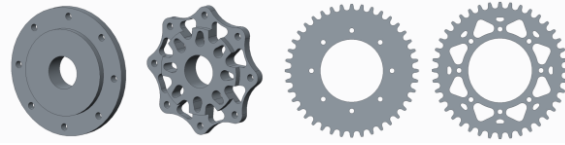


Fig. 17, 18 대기어 마운트 터미/최적화 형상 Fig. 19, 20 대기어 터미/최적화 형상

[2] 에어로 다이내믹

차량 구동계의 출력이 40kW 에서 80kW 로 발전됨에 따라 그의 출력을 안정적으로 제어할 수 있도록 에어로 다이내믹을 적용하였다. 에어로 시스템은 바디를 포함하여 전·후방 공력장치(윙)와 휠 사이 난류형성을 방지하는 디퓨저와 사이드포드도 구성하였다. 먼저, 차량 바디의 경우 하이-미들 노즈로 설계하여 체결공간과 프론트 윙으로의 유량확보를 이끌었다.



Fig. 21 바디카울 노즈형상

다음으로, 전방 및 후방 공력 장치로서 윙을 부착하였다. 차량에 장착될 모든 윙 엘레먼트는 Eppler E423 모델을 채택하였다. E423 에어포일은 다른 모델과 비교하여 저속에서 Low Reynolds 와 High Lift 특성을 가지므로 낮은 속도에서 높은 다운포스를 발생하는 formula student 차량에 적합하다고

판단했다. 먼저, 리어 윙 모델을 스케치하며 파츠 설정에 따른 다운포스 발생 수치를 비교해보며 에어로 다이내믹을 이해하는 시간을 가졌다. 리어 윙은 해석시간 단축과 실제 변수를 줄이고자 평균적인 초기 에어로 차량을 따라 이중 윙을 의도하였다. 이러한 기존 형상을 기반으로 chord 길이를 조절하여 여러 하위모델을 설계한 뒤, 유동해석으로 얻은 Z-Trajection(항력)과 Y-Trajection(양력) 으로부터 항력대비 양력비를 비교하여 최종모델을 선정하였다. 눈에 띄게 유의미한 다운포스를 보였던 두 모델을 비교하며 양항비를 구한 결과 A 모델이 3.5, B 모델이 3.2로, A 모델이 더 높은 효율성을 지닌 것을 확인할 수 있었다. Hyperworks CFD 로 얻은 리어 윙 최종모델의 다운포스는 시속 80km/h 기준, 128N 이다.

다음으로, 리어 윙 다운포스 배분을 고려하여 차량 전방에 프론트 윙을 장착하였다. 초기 디자인으로 리어 윙 구조로부터 프론트 윙도 이중윙 형상의 모델을 구현하였다. 그러나 2022 KSAE formula 차량기술 규정집에서 전방공력장치 부착범위 제한 규정으로 프론트 윙의 높이가 제한되면서 윙의 다운포스에 지대한 영향을 주는 복합받음각을 높이는 데 한계가 있었다. 시뮬레이션을 통해 얻은 다운포스는 시속 80km/h 기준 36N 으로, 다운포스 밸런싱 한계를 증명하였다. 그로 인해 규정상 허용되는 전륜 안쪽 범위 내에서 플랩 받음각을 올려 다운포스 밸런싱을 안정적으로 맞추고자 하였고, 얻은 최종 설계모델은 다음과 같다. 더 높은 받음각으로 설정할수록 오히려 플랩 언더에 유동박리 발생으로 방해 항력이 증가하는 추세를 보였다. 따라서 박리발생 범위 내에서 받음각을 최대 높여 다운포스를 최대 이끔었다. 프론트 윙 최종모델에서 발생되는 다운포스는 시속 80km/h 기준 84N 으로, 초기에 목표했던 다운포스 밸런싱 50%보다 낮은 40%로 밸런싱을 맞추며 사이드 파츠로 추가적인 보정을 시도하였다.

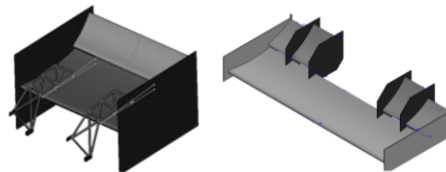


Fig. 22, 23 리어윙(좌) 프론트윙(우)

세부 다운포스 밸런싱 조절과 전륜과 후륜 사이 난류를 층류로 유도하기 위해 사이드 파츠로서 사이드 디퓨저를 추가하였다. 디퓨저는 부피가 작은 형상에 비해 다운포스 성능이 뛰어난 파츠로, 벤츄리관이 기초로 적용된다. 보통은 차량 후방에 부착되는 리어 디퓨저를 포함하지만, 올해 차량 프레임 구동부 설계를 진행하면서 디퓨저를 장착하기 위한 공간확보에 한계가 있었다. 따라서 올해 차량은 사이드 디퓨저 만으로 디퓨저 역할을 이행할 생각이다. 디퓨저의 경우 정형화된 설계방식이 부재하기도 했고 팀마다 형상이 천차만별이라 초기 설계과정에서 어려움을 겪었으나, 해외 팀 자료를 참고한 결과 inlet 과 outlet 높이를 middle tube 와 비교하여 비율로 조정하는 방식을 채택하여 벤츄리관을 형성하였다. 사이드 디퓨저의 경우 outlet 을 높게 설계할수록 리어로 유량확보가 용이하고 다운포스가 극대화되지만, 윙 설계를 마친 상황에서 다운포스가 이미 후방에 몰려있는 상황에서 앞선 설계 방식을 채택하는 것은 옳지 않다고 판단했다. 따라서 middle 높이를 라디에이터 간섭 범위 내에서 35mm 로 제한한 후, 무게 대비 다운포스 효율과 층류형성을 중심으로 높이를 달리하여 CFD 해석을 진행했다. 벤츄리관 입구 48mm, 출구 210mm 로 채택하며 디퓨저 설계를 마쳤다. 사이드 디퓨저에서 발생하는 다운포스는 시속 80km/h 기준 36N 으로 다운포스 발생보다도 층류형성을 주요 목적으로 장착할 계획이다.

사이드 파츠에서 사이드 디퓨저의 연장선으로 유선을 부드럽게 이어주고 차량 양 사이트에 장착되는 라디에이터를 보호하기 위한 목적으로 사이드포드를 설계하였다. 실제로 사이드 포드가

냉각에 영향을 줄만큼 형상학적인 부분이 많이 필요한 부품이다. 그러나 올해 모터와 컨트롤러 발열을 잡을 수 있는 라디에이터를 선정하면서 부피가 큰 모델이 부각되면서, 사이드 포드 특유의 곡선형 형상과 달리 높이 변화없이 설계를 진행했다. 다만 디퓨저와 같은 이유로 입·출구 면적 차이를 주었고, 전륜에서 후륜으로 넘어가는 난류가 균일하게 흘러갈 수 있도록 사이드포드의 옆면을 곡선형으로 마감하였다.

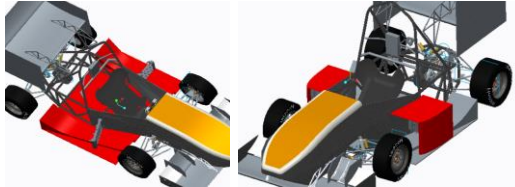


Fig. 24, 25 사이드 디퓨저(좌), 사이드포드(우)

2. 해석

[1] 구동계 마운트 부품

(1) Mount 부품

각 부품은 로드케이스 별로 나누어 SimSolid 에서 구조해석을 진행하였으며, 각 부품 별 가장 높은 응력이 분포된 해석결과를 본 보고서에 첨부하였다. 본 보고서에는 가장 높은 응력이 분포된 해석결과에서 Von Mises Stress, Factor of Safety 의 이미지를 첨부하였다.

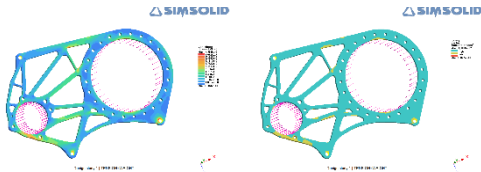


Fig. 26, 27 LSD 및 모터 마운트 Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

LSD 및 모터 마운트에서는 Von Mises Stress 가 최대 47.1 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 1.17 로 확인되었다. 해당 부위는 볼트 체결 부위이다.

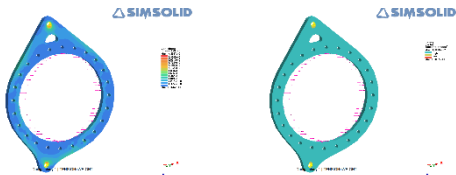


Fig. 28, 29 LSD마운트 Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

LSD 마운트에서는 Von Mises Stress 가 최대 42.0 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 1.31 로 확인되었다. 해당 부위는 볼트 체결 부위이다.

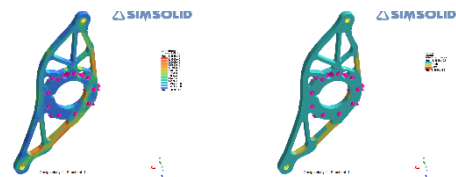


Fig. 30, 31 모터 마운트 Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

모터 마운트에서는 Von Mises Stress 가 최대 54.0 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 5.11 로 확인되었다.

최적화 및 해석 진행 후, LSD 및 모터 마운트와 LSD 마운트는 AL6061-T6 로 초기설계가 진행되었지만, AL6061 로 소재변경을 진행하였다. 모터 마운트는 재료의 항복응력을 초과하여 AL6061-T6 로 소재변경없이 제작 진행하였다.

(2) Tensioner 부품

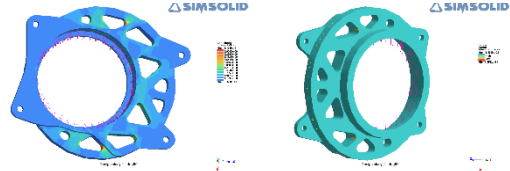


Fig. 32, 33 편심조절기(좌) Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

편심조절기(좌)에서는 Von Mises Stress 가 최대 11.3 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 24.5 로 확인되었다.

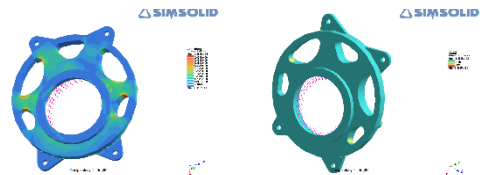


Fig.34, 35 편심조절기(右) Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

편심조절기(右)에서는 Von Mises Stress 가 최대 7.29 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 37.9 로 확인되었다.

Tensioner 부품들은 최소 3 년간 재사용 가능한 부품을 설계하여야 하므로, 보수적인 안전계수를 확보하였다.

(3) 대기어 마운트 및 대기어

대기어 마운트는 체인 텐션 그리고 구동계 토크, 두가지 로드케이스로 나누어 구조해석을 진행하였다. 대기어는 보수적인 해석을 위하여 모든 Tooth 에 체인장력을 로드로 두어 구조해석을 진행하였다. 두 로드케이스 중 더 큰 Von Mises Stress 분포가 나타난 로드케이스의 해석 Figure 를 본 보고서에 첨부하였다.

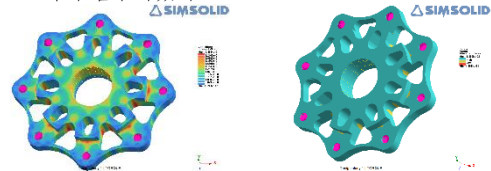


Fig. 36, 37 대기어 마운트 Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

대기어 마운트에서는 Von Mises Stress 가 최대 28.1 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 17.9 로 확인되었다.

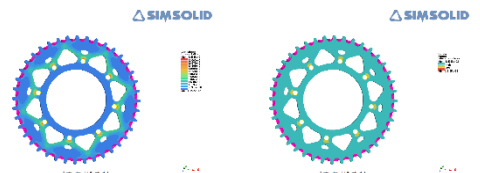


Fig. 38, 39 대기어 Von Mises Stress 분포(좌), Factor of Safety 분포(우)

대기어에서는 Von Mises Stress 가 최대 66.9 MPa 확인되었고, Factor of Safety 의 최솟값이 7.5 로 확인되었다.

(4) 정리

	Material	Von Mises Stress (Max)	Factor of Safety (Min)
LSD 및 모터 마운트	AL6061	47.1 MPa	1.17
LSD 마운트	AL6061	42.0 MPa	1.31
모터 마운트	AL6061-T6	54.0 MPa	5.11
편심조절기(左)	AL6061-T6	11.3 MPa	24.5
편심조절기(右)	AL6061-T6	7.29 MPa	37.9
대기어 마운트	AL7075-T6	28.1 MPa	17.9
대기어 마운트	AL7075-T6	66.9 MPa	7.5

Table. 2 Topology Optimization 부품들의 Max. Von Mises Stress와 Min. Factor of Safety

설계의도가 달라지더라도 재사용가능한 부품인 편심조절기(左), 편심조절기(右)와 대기어 마운트의 Factor of Safety 를 높일 수 있도록 형상 설계를 진행하였다.

[2] 에어로 다이내믹

(1) CFD

에어로 시스템을 도입하면서 다운 포스를 수치적으로 확인하는 과정이 필요했고, CFD 해석 툴로 알테어社에서 후원받은 Hyperworks CFD 를 사용하였다. 해석 시 필요한 Control volume 의 wall settings 와 차량의 세팅 노하우를 확립하기 위해 Altair Academic Program 에서 제공하는 Racing Car External CFD 영상을 참고하였다. CFD 는 meshing 과정 해석값의 정확도가 천차만별이다. 따라서, 차량 해석 진행과정에서 차량 surface 에 가까워질수록 정밀한 메쉬 작업을 진행하고자 하였다. 또한 차량 프레임 바디와 복잡한 구동부로 인해, 전처리 과정에서 단일화에 한계가 있었다. 따라서 복잡한 형상의 프레임구조와 구동계를 하나의 솔리드 바디로 변환하여 차량구조를 단순화하는 과정을 추가하였다.

이를 기반으로, 차량 전처리 셋팅값과 해석과정 및 결과를 본 보고서에 작성하고자 한다.

Control volume 역할의 Computatuinal domain box 의 경우, 정교함과 해석시간이 비례한다. 따라서 일반적으로 알려진 inlet 을 차량의 2 배 거리, outlet 을 5 배 거리, 높이를 5 배로 설정하였다. 이후, Wall settings 는 다음과 같이 설정해주었다.

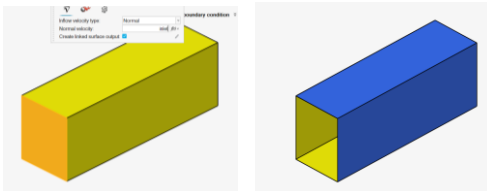


Fig. 40,41 Inlet velocity 80km/h(좌), Slip(우)

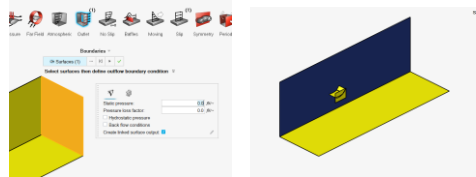


Fig.42,43 Outlet (velocity 0km/h)(좌), symmetry(우)

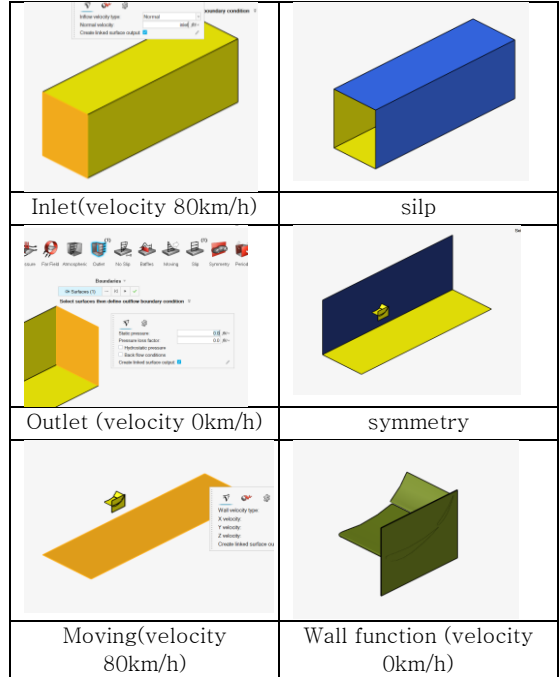


Fig. 44,45 Moving(velocity 80km/h)(좌), Wall function (velocity 0km/h)(우)

해당 세팅으로 차량해석을 진행했으며, 차량의 전체 다운 포스는 시속 80km/h 기준 217N으로 파츠 중량대비 높은 다운포스를 확인할 수 있었다.

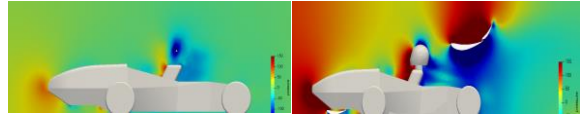


Fig. 46,47 Non aero(좌), Full aero(우)

에어로 파츠 장착 전·후 압력분포를 비교하며, 에어로 파츠 상부에 고압대가, 차량의 하부에 저압대를 확인하며 실질적으로 다운포스가 발생함을 증명하였다.

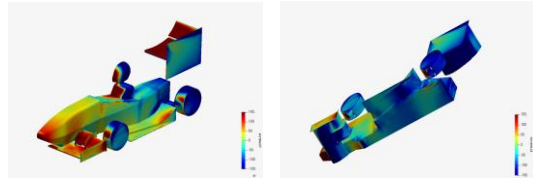


Fig.48,49 차량 상부 압력분포(좌), 차량하부 압력분포(우)

차량 전체 유동해석 기준, Z-Trajectory와 Y-Trajectory 을 수치화하여 각 파츠별 양력과 항력을 정리하였다. 또한, 양항비로부터 유의미한 에어로 효율을 확인하고자 하였다.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

$$L_D = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

위 수식으로부터 양항비를 비교한 결과 리어윙은 3.1 프론트윙은 3.2 사이드디퓨저 2.3으로 전체 양항비는 3.01이다.

Table.3 파츠별 DownForce와 Drag Force

Rear Wing	
DownForce	102N
DragForce	33N
Front Wing	
DownForce	87N
DragForce	27N
Side Diffuser	
DownForce	28N
DragForce	12N

3. 제작

(1) 워터젯 가공 및 CNC 밀링 가공, 아노다이징 가공



Photo. 1 워터젯 가공 Photo. 2 CNC 밀링 가공

모든 부품들은 원활한 워터젯 가공 및 CNC 밀링 가공을 위하여 Inspire 위상최적화 과정에서 압출기능을 이용하였다.

LSD 및 모터 마운트, LSD 마운트, 모터 마운트는 워터젯 가공을 통해 제작되었다. 앞서 서술하였듯이, LSD 및 모터마운트, LSD 마운트는 AL6061, 모터 마운트는 AL6061-T6 를 재료로써 이용하였다. 워터젯 가공 시, 테이퍼 현상 및 물줄기 자국이 남아있음을 고려하여, 볼트가 위치하는 구멍을 1mm 만큼 작게 가공하였다. 이후 드릴링 가공을 진행하여 볼팅 절단면을 후처리 하였다.

보다 입체적인 형상을 가진 편심조절기(左), 편심조절기(右), 대기어 마운트, 대기어는 CNC 밀링 가공을 진행하였다.

형상최적화가 진행된 모든 구동계 부품들은 경질 아노다이징 처리를 통해 표면의 성질을 절강보다 강하고 경질 크롬 도금보다 내마모성이 우수하게 처리하였다.

(2) De-Drift(DKT-22)에서의 실적용

부품을 재설계함에 있어 제작과정에서 가장 중요한 점은 부품을 차량에 설계한 위치에 장착해야 한다. 적절한 위치에 배치하기 위해서 프레임을 고정하는 지그 및 프로파일에 LSD 하드포인트 지그를 고정할 수 있도록 설계를 진행했으며, 해당 지그를 통하여 링크를 용접하였다.

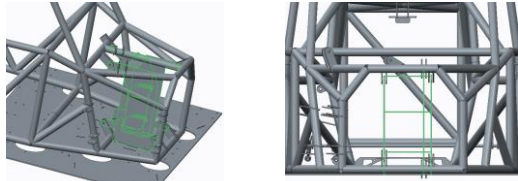


Fig. 50 LSD 하드포인트 자유 View Fig. 51 LSD 하드포인트 후면도

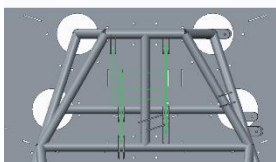


Fig. 52 LSD 하드포인트 지그 평면도

LSD 하드포인트 지그를 이용하며 빠른 용접으로 인하여 용접 열변형이 생겼고, 링크를 절단하고 재용접하는 과정이 있었지만, 올바른 위치에 LSD 및 모터를 장착할 수 있게 되었다.



Photo. 3, 4, 5 마운트 부품 실적용 사진

(3) 핸드레이업 기반 진공성형 CFRP

올해 차량에 에어로 파츠가 새롭게 대거 장착되면서 무게 대비 다운포스를 확보하기 위해 제품자체의 경량화를 목표로 할 필요가 있었다. 그에 따라 저중량 고강도 특성을 지닌 카본 섬유를 주요 소재로 정하고 핸드레이업을 기반한 진공성형을 제작방식으로 채택하였다.

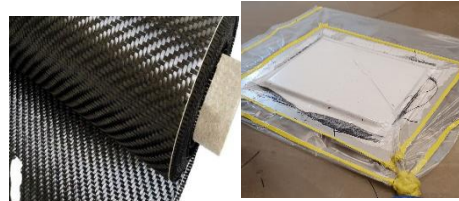


Fig. 53,54 카본 200gsm 3K 능직(좌) 카본플레이트 진공성형(우)

진공성형의 경우 카본 간에 수지함량을 높여 같은 두께에서 더 높은 강성을 야기한다. 추가적으로 워링 파츠의 경우 강성확보를 위해 내부 구조를 10t PVC 코어에 카본 섬유를 샌드위치 기법으로 쌓아 다음과 같이 보강하였다.

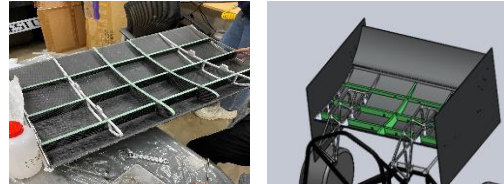


Fig. 55,56 워링-스파 실제제작과정(좌) 워링-스파 CAD 모델(우)

카본 플레이트 역시 핸드레이업과 진공성형으로 직접 제작한다. 완성된 에어로 파츠의 총 중량은 15.1kg 으로 19년도 유리섬유 바디카울 중량(8kg)과 비교하여 충분히 경량화를 달성했다.



Photo. 6 7월 파주 연습주행

4. 검증, Test 결과

차량 제작을 모두 마친 후 수차례의 연습주행을 통해 검증 및 테스트를 하였다. 총 주행거리와 주행 시간은 각각 약 50 km, 20 시간이다. 주행테스트는 대회 컨디션과 동일하게 유지하기 위하여 모터의 출력을 6500 rpm, 210 Nm 로 가속 주행을 하였으며, 4500 rpm, 180 Nm 로 스키드패드 및 짐카나코스를 주행하였다. 차량의 출력을 최대로 하여 극한의 주행을 지속적으로 진행하였지만, 가장 안전계수가 낮았던 모터 마운트와 LSD 및 모터 마운트를 1:1 비율로 도면을 프린트하여 우선 비교하였을 때, 변형이 없음을 확인하였다.



Photo. 7 모터 마운트 도면



Photo. 8 모터마운트 도면 비교

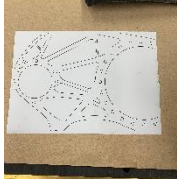


Photo. 9 LSD 및 모터 마운트 도면



Photo. 10 LSD 및 모터 마운트 도면 비교

본 보고서에 모두 첨부하지는 않았지만, 위상최적화가 진행된 모든 부품을 Photo. 3, 4, 5, 6 과 같은 방법으로 소성변형이 일어나지 않았는지 실증하여 변형이 없음을 확인하였다.

에어로 파트에서 검증할 사항은 차량의 진동을 충분히 견딜 수 있는 강성이 확보가 되었는지, 유의미한 다운포스를 보이는 지다. 차량 완성 후 몇 번의 테스트 주행을 통해 윈이 진동을 견디지 못하는 경우가 발생했고, 내부에 립 구조를 추가하는 보강작업이 있었다. 반면, 차량 성능 측면에서 작년 차량보다 안정적이라는 드라이버의 의견을 얻을 수 있었다. 실제로도 코스 헤어핀 구간에서 차량의 롤링현상이 현저히 줄어들었고, 접지가 향상됨을 확인할 수 있었다. 따라서 CFD 해석으로 얻은 차량의 다운포스가 실제로도 유의미함을 검증하였다.

5. 원가 절감 사례 (3 건 이하)

새롭게 에어로 파트를 도입하면서 가공방식에 대한 고민이 있었다. 모든 에어로 파트는 핸드 레이업을 기반으로 한 진공성형으로 직접 제작하였으며, 내부에 구조화되는 립-스파를 카본파이프와 알루미늄 가공체가 아닌 10T 카본플레이트를 제작하여 교내 CNC 가공으로 내부 구조를 완성하였다. 카본파이프와 알루미늄 레이저 커팅 가공비를 카본섬유와 PVC 코어만으로 대체한 결과, 그에 부합하는 강성을 가지면서도 가공 비용을 절감하고자 하였다.

LSD 및 모터 마운트, LSD 마운트, 모터 마운트의 가공방식을 CNC 에서 워터젯으로 변경하였다. 워터젯 가공은 CNC 가공보다 열로 인한 변형이 적어 차량에 부착했을 때, 링크와 볼팅이 용이했으며, CNC 비용의 1/5 가격으로 가공할 수 있었다.

6. 결론

앞서 보고서 본문에서 언급했듯이, 2021 년도 차량의 FCC TRAC LSD 에서 내부 부품의 마모로 인하여 Drexler LSD 로 변경하며 그에 따라 구동계 관련 부품들이 새로 설계 및 제작 진행되었다. 이에 본 팀은 Inspire 최적화를 통해 경량화를 진행하였으며, 결과적으로 모든 구동계 부품의 무게가 25.3 kg 에서 20.2 kg 으로 20.1% 경량화를 이룰 수 있었다. 또, 경량화를 진행할 뿐만 아니라, SimSolid 를 이용한 구조해석 과정을 거쳐 구동계에서 이용할 수 있을 만큼 강성이 확보되었다는 것을 확인하고 테스트 주행을 통해 1:1 배율 도면을 통하여 검증과정도 진행했다. 대회 전까지 추가적인 주행을 통해 변형이 없는지 지속적으로 확인 해 볼 예정이다.

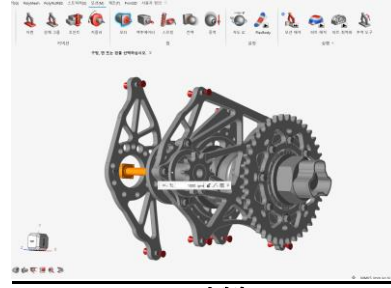


Fig. 38 Altair Inspire 모션해석

추가적으로 구동계의 모든 부품이 Assembly 상태로 모션해석이 가능하다는 것을 확인하였으며, 2023 년 구동계 설계과정에서는 Inspire 의 Motion 해석 기능을 이용하여 다양한 위상최적화 과정과 해석 과정을 진행할 것이다.

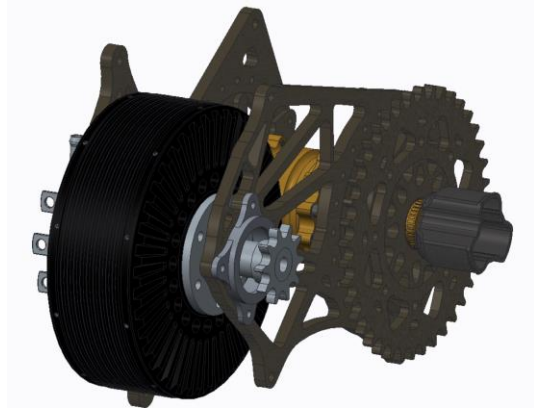


Fig. 57 LSD & Motor Assembly Isometric View



Fig. 58, 59 LSD & Motor Assembly Left / Right View

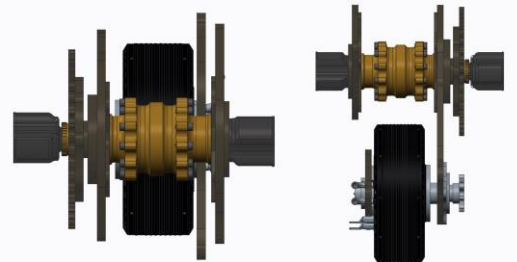


Fig. 60, 61 LSD & Motor Assembly Back / Top View

Hyperworks CFD 를 통해 에어로 첫 시도에 불구함에도 유의미한 다운포스를 얻으며, 차량의 안정성을 확보할 수 있었다. 여러 하위 모델로부터 최상의 다운포스를 갖는 모델을 선정하는 과정에서 CFD 해석의 중요성을 깨달았고, 추가적인 연습주행을 통해 Non aero 차량일때와 Full aero 차량의 성능테스트를 진행하여, 에어로다이남 적용에 대한 근거를 더할 예정이다. 정립한 CFD setting 값을 기반으로 내년 차량의 다운포스 성능 향상을 목표로 에어로 시스템을 바라보고자 한다.

References

- 1) Derek Seward, Race Car Design, 2014.10.14
- 2) Michael Brown 외 4 명, Formula Electric Drivetrain Final Design Report, 2014.03.21
- 3) Caleb's Engineering Projects, How to Design an Electric Powertrain, 2020.09.03
<https://www.youtube.com/watch?v=Hg7MXIgeig4>
- 4) Photo. 1, "waterjet", learn about waterjet, swaterjet
<https://swaterjet.com/learn-about-waterjet-cutter>
- 5) Photo. 2, "CNC", How to Lengthen the Service Life of a CNC Machine, Emma Dylan
<https://www.clarkedailynews.com/how-to-lengthen-the-service-life-of-a-cnc-machine.html>
- 6) Aerodynamic development of a IUPUI Formula SAE specification car with Computational Fluid Dynamics
- 7) Evaluating aerodynamics with Altair CFD Solutions
[Evaluating aerodynamics with Altair CFD Solutions - YouTube](#)