

2021 대학생 자작자동차대회 알테어 최적설계상 보고서



학교명		한양대학교	팀명	RACE_600
차량번호		144	팀장	황남주
차량	이름	FORSYTHIA		
	제원	전장 2920.9 mm × 전폭 1340 mm × 전고 1190.2 mm (무게 270.1kg)		

상기 참가팀은 2021 대학생 자작자동차대회의 알테어 최적설계상 부문 보고서를 다음과 같이 제출합니다.

2021 년 11 월 18 일

대학생 자작자동차대회 조직위원회 귀중

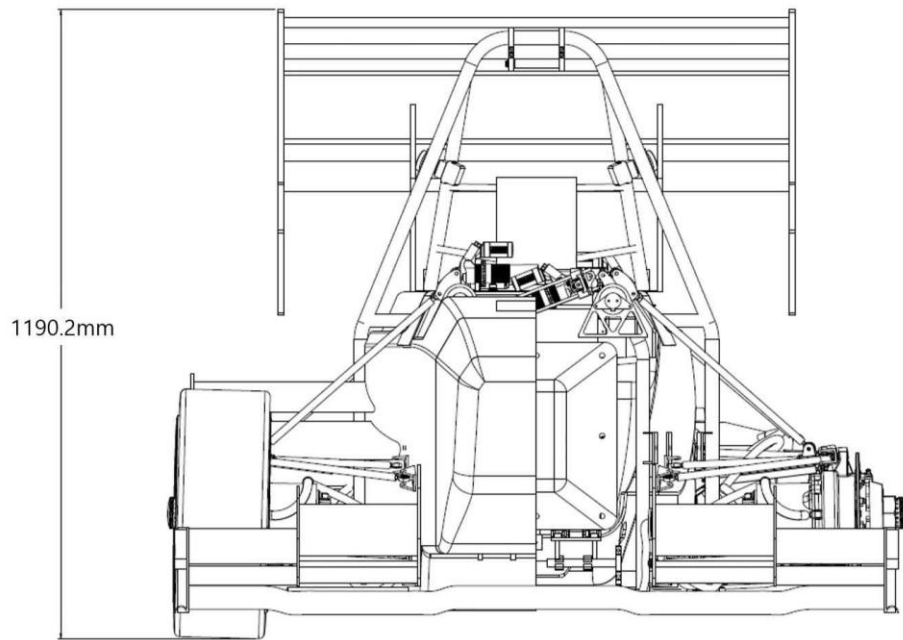
- 설계 보고서 작성법은 아래와 같습니다.

- 1) 가급적 어떤 기술(방법)을 적용 했느냐가 아니라 어떤 이유로 CAE 를 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(흡,배기), 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(3 건이하) / 결론 / 참고 문헌

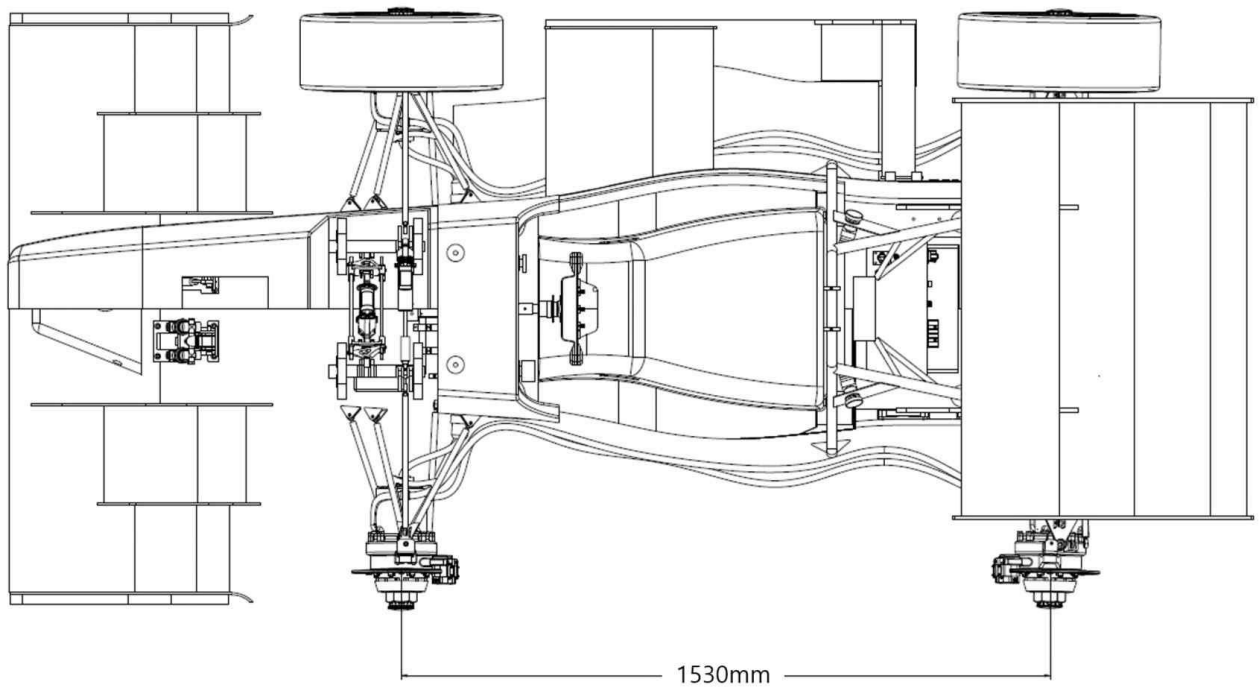
- 본 문서는 7/28(수) 오후 5 시까지 아래 메일로 제출 바랍니다.
- 제출 메일 : LAB@altair.co.kr

1. 도면

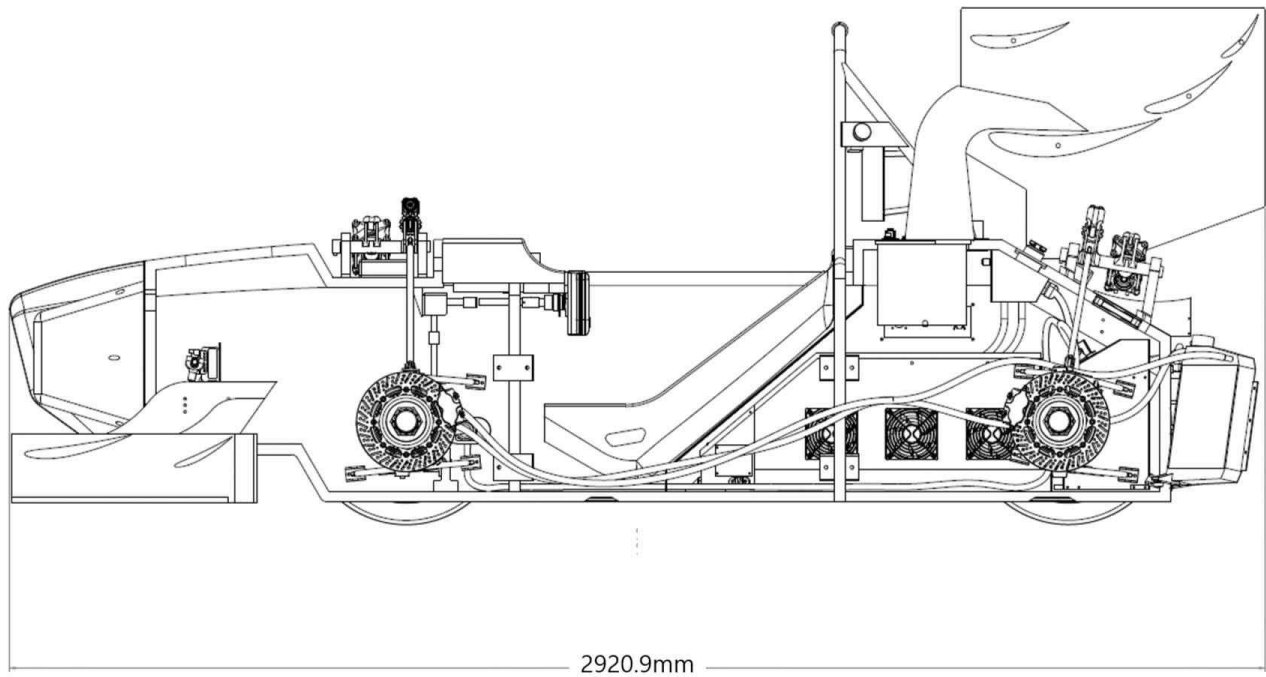
1) 정면도



2) 평면도



3) 측면도



4) Isometric view



설계 보고서 : FORSYTHIA 최적설계 보고서 인휠 구동계의 패키징에 기반한 업라이트 최적설계

황남주 이상진 염원준 김세웅 강영재 이한결 이동섭 홍윤석 문기용 임규빈 한호범 김동규 윤영웅 이재홍 최리

한양 대학교 RACE_600 팀

본 팀은 2020년 9월부터 현재까지 4개의 In-Wheel 모터를 사용한 AWD방식의 파워트레인을 연구하고, 이를 장착한 차량을 제작 및 운용 중이다. 구동계 및 쿨링시스템의 경량화와 효율적인 패키징을 위해 Altair Hyperworks를 사용하여 Upright에 대한 최적설계를 진행하였다. 2단 유성기어를 사용함에 따라 기어를 먼저 설계한 후 이를 기준으로 Upright 설계를 시작하였으며, Suspension팀에서 계산한 하중값으로 구조해석을 진행해 경량화를 도모했다. 추가 가공 없이 제작할 수 있도록 수정사항 발생 시 업라이트 파트를 3D프린팅 mock-up으로 선제작하여 구동 여부와 정비성을 체크하였다. Cornering, Braking, Traction의 3가지 주행상황에 대한 하중을 계산하여 구조해석을 진행한 결과, 휠과 타이어를 제외한 Unsprung mass 11.42kg의 업라이트를 제작할 수 있었다. 2개의 Rear PSMS모터를 장착한 이전 차량의 Unsprung mass보다 5.61% 경량화 되었으며, Powertrain 총 무게 대비 최대출력을 계산했을 때 2.2배의 효율을 가진 차량을 완성하였다.

1. 설 계

1.1. 서론

지난 2년간 본 팀은 최대전압 120V, 최대 출력 40kW급의 듀얼모터 차량 RH27을 제작하여 주행성능을 확인하였다. 그러나 2개 합 31.8kg에 달하는 모터와 68.9kg의 배터리박스가 후륜에 위치하여 35:65의 무게배분을 갖게 되어 주요 파트의 위치조정 및 설계변경과 에어로 파트의 추가 장착이 필요하였다.

이에 올해 Forsythia에는 국내 최초로 4개의 인휠모터를 사용하는 AWD방식의 Powertrain을 시도하였다. 인휠 구동계를 패키징하기 위해 이전과 다른 유성기어 방식의 감속계가 요구되었고, 최적 패키징 및 경량화를 위해 업라이트 어셈블리에 대하여 최적설계를 진행하게 되었다.

1.2. 초기 설계 과정

업라이트의 각 파트 사이즈는 유성기어의 설계에 기반하며, 유성기어는 기어박스 역할을 하는 너클 안쪽에 패키징된다. 가장 먼저 기어를 설계하기 위해 기어 강도 계산식과 기어 사이징 수식을 교차하여 유성기어의 PCD를 산정한 후, 패키징이 가능한 사이즈의 너클을 디자인하였다. 이를 바탕으로 허브 베어링, 캐리어, 오일실 등 업라이트 구성품의 사이즈를 확정하였으며, 너클과 허브 등은 최대한 MCT와 CNC로 가공이 가능하도록 설계하였다. 구성품은 모두 3D 프린터로 출력해 조립하며 유격 및 간섭, 정비성을 확인해가며 설계를 완성하였다.

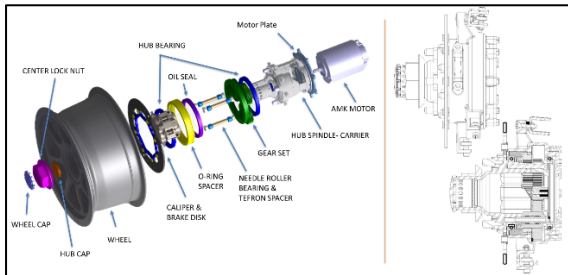


Photo. 1 Upright Layout

이러한 초기 설계를 바탕으로 업라이트 구성품이 무한수명을 가지고 서스펜션에서 요구한 unsprung mass 15kg을 타겟값으로 하여 최적 설계를 진행하였다. 알루미늄 7075T6의 SN선도를 참고하여 100만 번의 수명을 넘기지 못

하는 곳에 필렛을 추가하고 힘을 받지 않는 부분은 홀을 파거나 두께를 줄이는 등의 방법으로 최적설계를 진행하였다.

2. 해 석

2.1. 구조해석 조건 산정 및 역학적 하중 계산
업라이트 부품 중 가장 하중을 많이 받을 것으로 예상된 너클, Inner Carrier, Hub Spindle을 구조해석 대상으로 선정, 각 파트가 받는 역학적인 힘을 주행상황에 따라 계산하였다. 최대 가속, 최대 감속, 코너링 상황의 총 3가지 주행상황을 가정하였으며 최대 가속과 최대 감속에서 노면과 타이어의 마찰계수 1.5를, 감속 시 drag force 300N을, 반경9.125m의 스키드패드 경기를 가정하여 다음과 같은 가속도, 감속도, 횡가속도를 산출하였다.

Table .1 Acceleration, deceleration, lateral acceleration

차량 중량(kg)	332.613
Acceleration	1.19g
Deceleration	1.86g
Lateral Acceleration	1.85g

극한의 상황을 가정하기 위하여 차량이 최대 다운포스 600N을 받을 때를 기준으로 설정하였으며, 새시 동적계수 3, 공기역학계수 1.3을 반영하였다. Upper A-arm과 Lower A-arm이 너클과의 체결점에서 받는 힘을 산출해 너클의 구조해석에 적용하였다.



Photo. 2 Direction reference

Table .2 A-arm Force

최대 가속(longitudinal)	Front	Rear
Upper A-arm(N)	523.11	1179.39
Lower A-arm(N)	-1398.94	-3200.75
최대 감속(longitudinal)		
Upper A-arm(N)	-1328.42	-395.7
Lower A-arm(N)	3552.57	1065.75
Cornering		
Pushrod directional force(N)	2077.73	1767.47
Lower A-arm(latitudinal)	-2095.14	-1786.75

Inner Carrier와 Hub Spindle은 모터의 회전

력을 견딜 수 있도록 설계하였다.

(모터 최대토크)*(기어비) 값을 중심에서 작용하는 회전력으로 산정해 반영하였다.

$$M_{\text{force}} = \text{모터 최대토크} * \text{기어비}$$

2.2 초기 설계 구조해석

업라이트 구성품 중 차량의 하중을 직접적으로 받는 너클과 기어와 직접 연결되어 기어의 회전력을 전달하는 이너 캐리어, 이너 캐리어로부터 전달된 회전력을 휠에 전달하는 허브 스피ndl에 대해 구조해석을 진행하였다. 재질은 경량화와 강도를 위해 알루미늄 7075T6를 채택하였으며, 경질 아노다이징으로 마감하여 보다 높은 강성을 가질 수 있도록 하였다.

Table .3 Aluminium 7075-T6 Material properties

Parameter	Values
Young's Modules	72.7 GPa
Poisson's Ratio	0.33
Density	$2.81 * 10^{-9}(\text{T/mm}^3)$
Tensile Yield Strength	503 MPa
Shear Modulus	26.9Gpa
Tensile Ultimate Strength	572MPa

Altair사의 지원을 받아 Altair Hyperworks 프로그램을 사용해 구조해석을 진행하였다. 여러 번 해석을 시도하면서 최적의 요소 사이즈를 결정하였으며, 2D형태에는 Quad Meshing을, 3D형태에는 Tetra Meshing을 적용하였다. 알루미늄 7075T6가 등방성 물질이기 때문에 mat1과 table3의 값의 단위를 환산하여 적용하였다.

2.3 이너 캐리어와 허브 스피ndl의 해석

이너 캐리어와 허브스핀들은 2.1절에서 산정한 돌림힘 M_{force} 값을 로드로 주었고, 중앙축을 SPC로 고정하여 응력을 확인하였다.

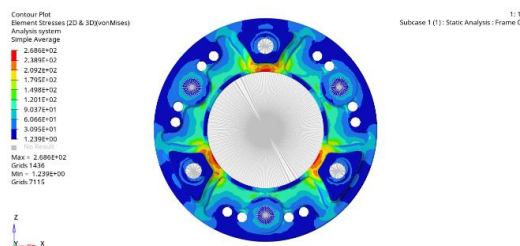


Photo. 3 INR-CARRIER

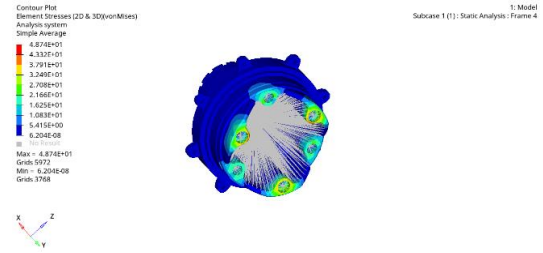


Photo. 4 HUB-SPINDLE

Photo.3과 Photo.4은 모델들의 응력을 나타낸 것이다. 허브의 최대응력은 48.74Mpa로 안전하다. 하지만 이너 캐리어의 경우 안쪽 가장자리 부분에 286.6Mpa이 집중되어 안쪽 원형의 형태를 바꾸었다. 하지만 허브와 이너 캐리어는 부피가 너무 작아 경량화하기에는 무리가 있음을 확인하였다.

2.4 너클 해석

너클은 모터의 중심축을 기준으로 constrain을 설정하고 3가지 각각의 경우에 대해 하중을 걸어 구조해석을 진행하였다. 먼저 초기 너클을 해석한 후, 응력집중을 해소한 모델을 디자인한 다음 응력이 덜 쌓이는 곳에 홀을 파거나 홈을 내는 방식으로 모델링을 하였다.

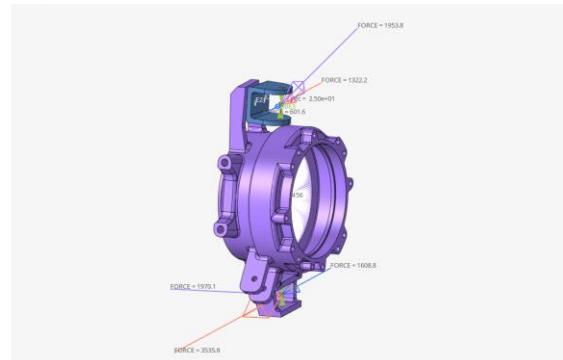


Photo. 5 Knuckle analysis

Photo.5에서 보라색 로드는 코너링 상황일 때, 주황 색 로드는 최대 감속 상황일 때, 마지막 파란 로드는 최대 가속 상황에서 너클에 가해지는 힘과 방향을 의미한다.

2.4.1 초기 너클 해석

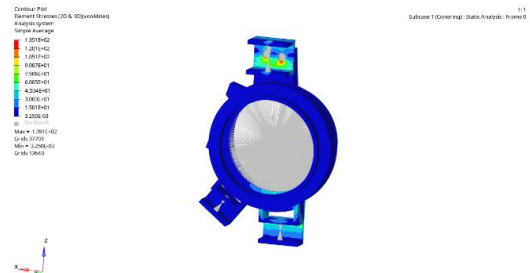


Photo. 6 knuckle Cornering (1)

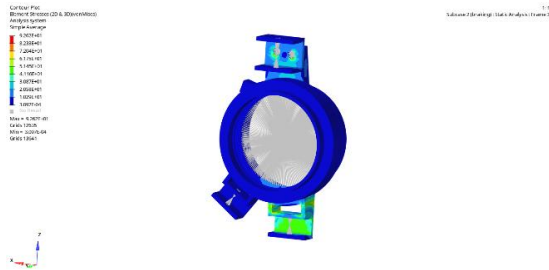


Photo. 7 knuckle braking(1)

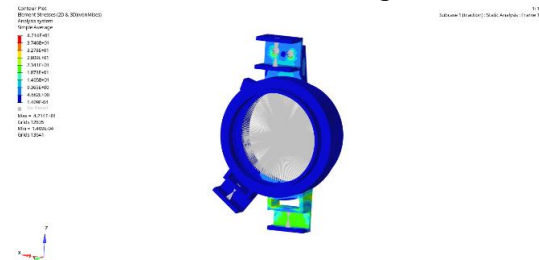


Photo. 8 knuckle traction(1)

위는 table 2 표에 있는 힘을 통해 초기 너클을 구조해석한 자료이다. 코너링, 최대 감속, 최대 가속 상황에서 안전한 결과가 나왔다. 위 사진을 바탕으로 설계를 개선해보았다.

2.4.2 수정 후 너클 해석

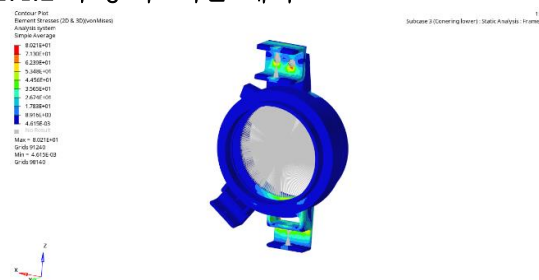


Photo. 9 knuckle cornering (2)

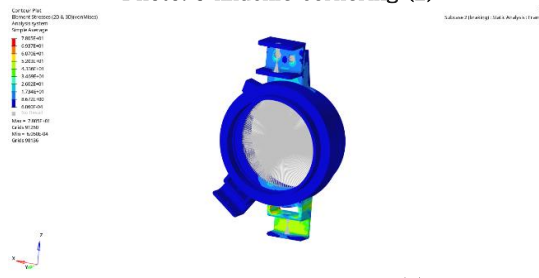


Photo. 10 knuckle braking(2)

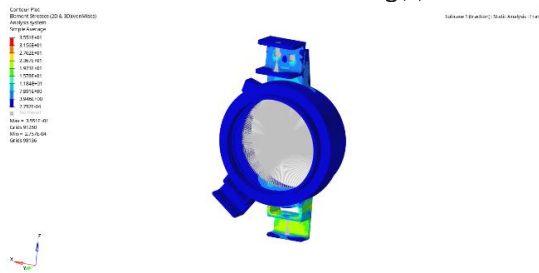


Photo. 11 knuckle Traction (2)

위 사진은 모델링 수정 후 너클의 구조해석

자료이다. 암 브라켓 쪽에 필렛을 추가하여 엣지에서의 응력 집중을 방지하였고 응력 집중이 적은 곳에 홀을 만들어 무게를 줄였다. 결과적으로 최대 응력이 전 설계보다 높게 나왔지만 무한수명 100만회를 상회하는 것을 알루미늄의 SN선도를 통해 확인하였다. 초기 설계보다 무게가 0.05kg만큼 줄어들었다.

2.4.2 최종 너클

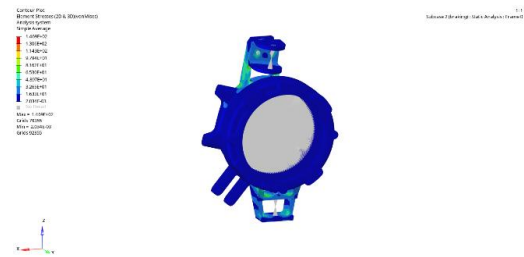


Photo. 12 knuckle Braking (3)

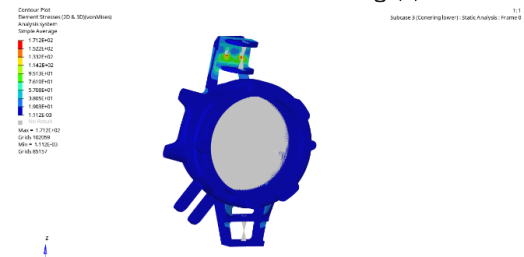


Photo. 13 knuckle Conering (3)

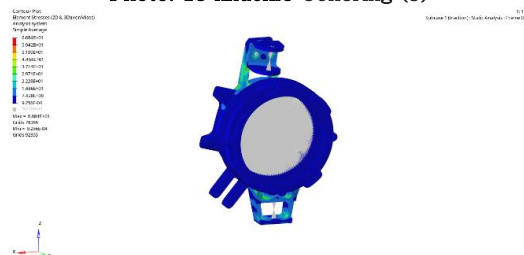


Photo. 14 knuckle Traction (3)

Photo. 11 12 13은 최종 설계의 업라이트로, 암 브라켓 부분에서 큰 변화가 있었다. 이전 암 브라켓은 한 쪽 방향 힘만을 고려하여 설계하여 반대 방향으로 힘을 주면 응력 집중이 높아지는 결과가 나왔다. 때문에 양방향의 힘을 균일하게 버틸 수 있는 형태로 설계를 바꾸었으며, 브라켓 쪽이 두꺼워졌지만 전반적으로 무게 또한 0.94에서 0.93 kg까지 줄여 전체 업라이트에 대하여 0.24kg을 줄일 수 있었다.

3. 제작

In-Wheel Drivetrain 의 모든 구성품들은 구동계, 즉 구동 전달 장치이다. 구동 전달 장치란 모터에서 발생한 구동을 최소한의 손실로 바꾸어 전달시키는 것이다. 이 구동계의 부품

들의 축이 조금이라도 틀어지면 동력이 손실되며 부품의 손상 및 파단을 초래하기 때문에 매우 높은 정밀성과 정확성을 요구한다. 그러한 이유로 업라이트의 구성품들은 CNC로 제작되었다. 너클, 허브 등 총 7개의 부품을 CNC로 제작하였다.

구성품들의 조립과 구동성을 체크하기 위해 3D 프린터로 업라이트의 프로토타입을 제작하였다. 그 과정에서 정비성이 떨어지거나 조립이 불가능한 구성품들을 수정 후 가공하였다.

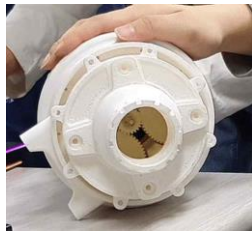


Photo. 15 3D printed prototype



Photo.16 5-way MCT



Photo.17 Hub&Spindle



Photo.18 Gear Assembly

4. 검증, Test 결과

현재 조달된 부품으로 차량 제작 중에 있어 실질적인 내구도 검증은 진행이 어려운 상황이지만 3D프린팅으로 만든 업라이트 프로토타입을 모터에 연결해 작동시키며 응력이 쌓여 프로토타입의 형태가 변하거나 마모가 발생하는 부분을 확인하였다. 3D프린터 자체의 공차 +0.3mm를 감안하여 출력해 확인한 결과 허브와 스피들, 너클에는 이상이 없으나 기어의 고른 마모가 발생함을 확인하고 SCM440H.T에 질화 열처리를 한 재질로 기어를 제작하였다. 실제 제작 후 확인한 결과 부드럽게 회전하는 기어 어셈블리를 확인할 수 있었다.

또한 전년도 차량과 비교했을 때 Optimum Lap으로 구한 내구레이스 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

Table.4 Optimum Lap Simulation

Elapsed Time [s] 0.000 5.043 10.086 15.129 20.171 25.214 30.257 35.300 40.343 45.386 50.429 KSAE Autocross 2019 V2 - Elapsed Continental C19 18in, 50.429sec (2021 Forsythia)	Elapsed Time [s] 0.000 5.065 10.130 15.194 20.259 25.324 30.389 35.453 40.518 45.583 50.648 KSAE Autocross 2019 V2 - Elapsed Hoosier 20in, 50.648sec (2020 RH27)
--	---

이전 차량에 비해 0.219sec 정도 랩타임이 감소하였음을 알 수 있다.

처음 시도하는 In-Wheel 구동계 업라이트이므로 구체적인 내구성 검증이 필요하지만, 기어와 업라이트의 가공비가 차량 제작의 큰 비중을 차지함에 따라 진행이 어려움이 있고, 시범주행을 통해 업라이트의 내구성을 판단하고자 한다. 하중을 신지 않았을 시 이상 없이 작동함을 확인하였으며, 추후 Electric Control 파트의 보완 작업이 종료되면 자체 내구레이스 시범주행을 통해 내구도를 확인할 계획이다. 주행 시 가해지는 하중을 계측하여 이론적으로 구한 하중조건과의 오차를 확인하고, 구조해석을 반복적으로 진행하여 최적의 설계로 Upright를 개선하고자 한다.

5. 원가 절감 사례

5.1. CATIA 모델링 및 구조해석을 통한 원가절감

전년도 차량의 업라이트 제작 경험을 바탕으로 불필요한 5축 가공품이 없고, 정비성을 충분히 고려하며, 후가공 및 재가공이 필요하지 않도록 정확히 업라이트를 설계하는 데 중점을 두었다. 이에 CATIA로 볼트와 너트를 포함한 모든 부품을 모델링하고 구조해석을 진행하였으며, 메카니컬 파트 팀원들로부터 끊임없이 피드백을 받아 정비성과 작업순서, 패키징을 고려하여 디자인 후 3D프린터로 목업을 제작해 확인하였다. 가공집에 직접 방문해 작업현황을 확인하며 추가적인 지출이 발생하지 않게끔 하였다.

5.2. 조립형 Upright

업라이트에 들어가는 가공품을 최대한 하나의 파츠로 가공해 정비성을 높이고 조립을 쉽게 하면서도, 3축과 5축 가공품은 분리하

여 최대한 가공비를 줄일 수 있도록 제작하였다. 또한 타이로드 브라켓과 워터자켓 등을 따로 가공하여 원가를 절감하였다.

6. 결 론

본 연구를 통해 인휠 구동계의 패키징과 업라이트 구성품의 최적설계를 진행한 후 실제 작업을 하였으며, 이전 년도의 차량과의 주행 시뮬레이션을 통해 설계의 효용을 검증하였다.

In-Wheel 구동계의 사용으로 Unsprung mass가 크게 증가할 것을 우려하였지만 알루미늄으로 너클과 허브를 가공하고 최적설계 및 간결한 패키징으로 오히려 이전 년도보다 무게를 줄일 수 있었다. 전년도 차량의 한 휠당 업라이트 무게인 12.1kg보다 0.68kg가벼운 11.42kg로 5.61% 감량을 이루었다. 서스펜션에서 요구한 Unsprung mass 15kg에는 미치지 못했지만 18inch Continental C19타이어와 10in OZ magnesium Wheel을 선정하여 총 17.17kg의 Unsprung mass를 구현하였다. 파워트레인 전체로 확장했을 때 총 무게 125.9kg, 최대출력 80kW를 반영하면 무게 대비 출력의 비율은 0.635로, 전년도의 0.285에 비해 2.2배의 효율을 갖게 되었다.

앞으로 지속적인 주행테스트를 통해 시스템을 최적화하고 하중계측을 통해 구조해석 및 최적설계의 유효성을 검증할 계획이다. 또한 2개의 모터를 사용한 전년도 차량에 비하여 차량 제작 전반에 걸쳐 어느정도 효용이 있는지를 판단하고자 한다.

근사 모델 기반 최적 설계.” “한국자동차공학회 추계학술대회.” 한국 자동차공학회, 2018.

References

- 1) Seward, Derek. *Race Car Design*. London: Macmillan Education, 2014.
- 2) 최계광조재웅. “전동킥보드 서스펜션 내구성 강화를 위한 구조해석.” 한국기계기술학회, 2021
- 3) GargAyush. “Fatigue Analysis and Optimization of Upright of a FSAE Vehicle.” IJSR, 2015.
- 4) 진성완, 김용갑, 박규식, 고수곤, 신인섭. “아우터 타이 로드 경량화를 위한