

2022 대학생 자작자동차대회 알테어 최적설계상 보고서



학교명	부 산 대 학 교	팀명	Auto-Lab
차량번호	114	팀장	성 현 두
차량	이름	Falcon _ 22	
	제원	2245.4 mm × 722 mm × 1075.4 mm (무게 : 180kg)	

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

2022 년 08 월 12 일

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(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)

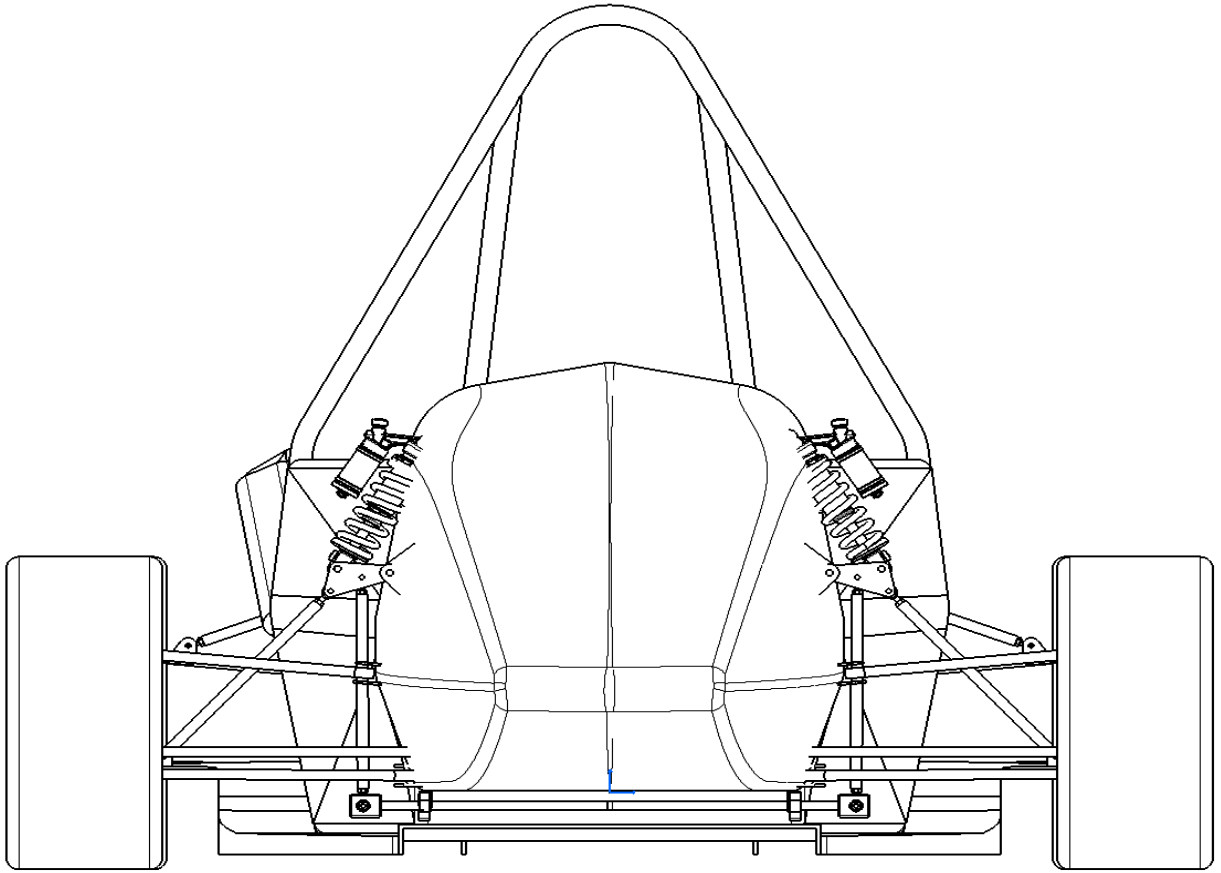
-요약 / 설계 / 해석 / 제작 / 검증, Test 결과 / 원가절감 사례(3건이하) / 결론 / 참고 문헌

- 본 문서는 8/12 (금)까지 아래 메일로 제출 바랍니다.

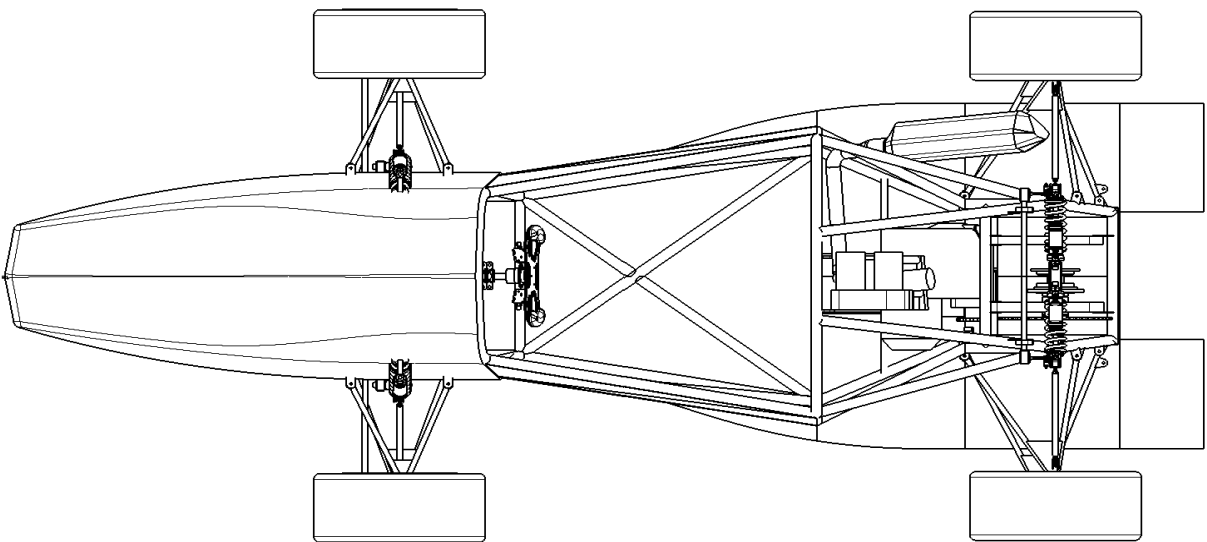
- 제출 메일 : LAB@altair.co.kr

1. 도면

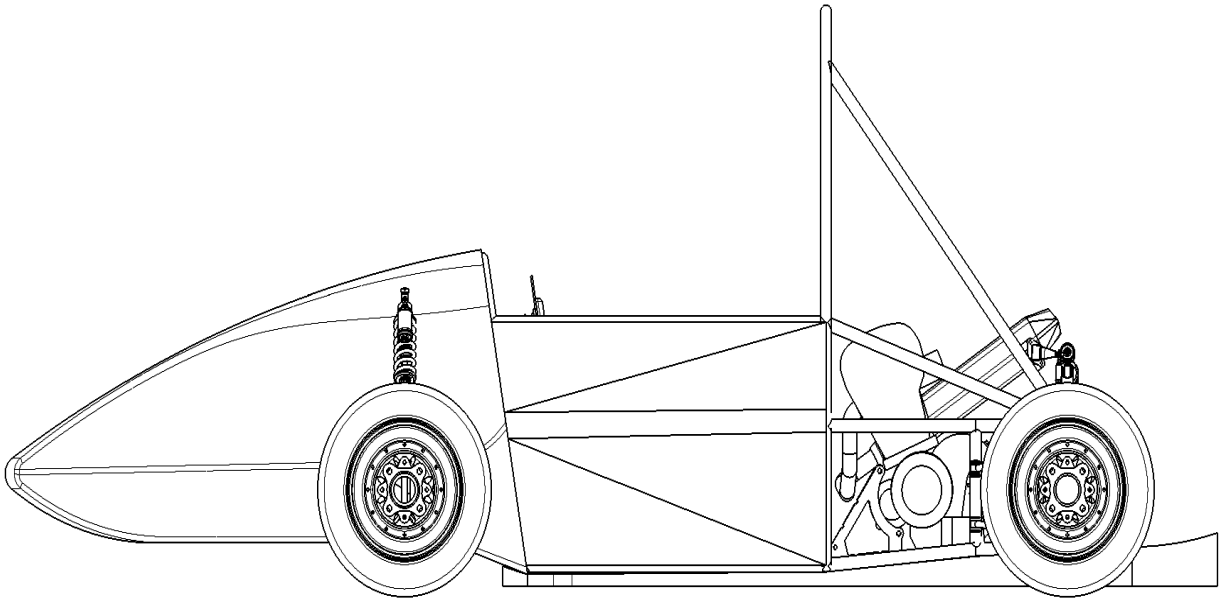
1) 정면도



2) 평면도



3) 측면도



4) Isometric view



설계 보고서 : Auto Lab _ 최적 설계 보고서
(Hyperworks CFD를 이용한 undertray 최적 설계, Inspire를 이용한 brake pedal 최적 설계 및 해석)

황도웅, 김태우, 박기정, 임동재, 김민규, 문준필, 이동현, 김진재, 이수호, 박시현, 김민기, 박윤정, 박수현, 정성민

부산대학교 Auto-Lab팀(Fal-22)

요약

본 팀은 2022년도 KSAE 자작자동차 대회 Formula 부문 출전을 위해 차량을 제작하였다. 전년도 대회에서 발생한 문제들을 파악하고 향상시키기 위해 최적 설계를 진행하였다. 금년도 차량 설계 시 반영하여 자동차의 성능을 향상시키기 위해 힘썼다. 최소의 질량을 가지되 최대의 강성과 강도를 가지며 안정성까지 갖춘 자동차를 제작하기 위해 Altair사의 Inspire와 Hyperworks 프로그램을 활용하여 설계와 해석을 진행하였고, 본 보고서에서는 새시의 제동장치와 공기역학의 undertray의 제작 과정을 담고 있다.

I. 서론

브레이크 시스템의 경우, Fal-22 차량 제작의 목표가 경량화임에 따라 브레이크 페달 어셈블리의 부피와 무게를 줄이는 데 집중하였다. Fal-21의 경우 해석을 통한 검증 없이 경량화를 진행한 결과 브레이크 페달이 변형되는 문제가 발생하였다. 따라서 금년에는 전년도 대비 10% 경량화를 목표로 설계를 진행하되 강성 확인을 위해 2000N 이상의 하중을 견딜 수 있도록 FEM을 활용하여 안전성을 함께 확인해가며 설계를 진행하였다. 경량화를 위하여 브레이크 페달 재료는 SS400에서 Aluminum 6061 T6로 변경하였으며 Inspire를 이용해 위상 최적화를 진행하였다. 이후 해석을 통해 페달에 가해지는 하중에 의한 전체 어셈블리의 최대 변위와 안전계수를 확인하고 페달 마운트와 레일의 두께를 결정하였다.

공력장치의 경우, 250cc 내연기관인 작년 차량은 출력이 낮아서 공력요소 부품으로 발생하는 항력이 오히려 차량의 성능에 악영향을 준다고 판단하였다. 항력을 최소화하기 위하여 불필요한 에어로 파츠를 없애는 방향으로 목표를 잡았고, 발생 항력 대비 양력 생성이 큰 undertray만 사용하는 것으로 결정하였다. undertray의 설계는 HyperWorks CFD 및 HyperGraph를 이용하여 throat 형상을 고정된 뒤 infuser와 diffuser를 반복 설계하며 최적화를 진행했다. 제작의 경우 작년에는 CNC 가공을 통하여 undertray 몰드를 제작하였으나 올해는 가공 비용 절감을 위하여 직접 몰드를 제작하였다.

II. 본론

1. brake pedal

1.1 설계

Fal-21의 경우 마스터실린더가 페달과 수직하게 고정되는 형태로 인해 페달 어셈블리 길이가 약 206mm로 상대적으로 길었으며 박스 형태의 페달 마운트로, 공간차지와 중량이 불필요하게 컸다. 이를 개선하기 위해서, Fal-22의 경우 페달과 비스듬히 설치 가능한 마스터실린더를 사용하여 어셈블리 길이를 79mm(39%) 감소시킬 수 있었으며 레일 형식으로 개선하여 레일이 프레임의 강성에도 도움이 되도록 하였다.

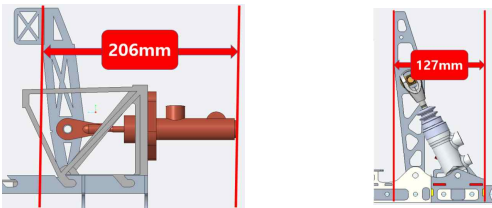


Fig.1 Fal-21과 Fal-22의 브레이크 페달 어셈블리 우측면도

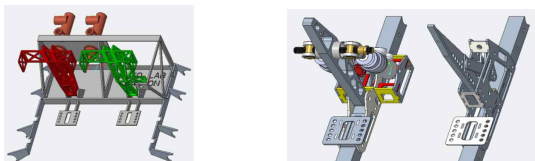


Fig. 2 Fal-21과 Fal-22의 페달 어셈블리 3D

또한, 작년도 부품별 무게비교표를 참고한 결과 상용품을 제외하고 페달 마운트 다음으로 무게 차지가 많았던 브레이크 페달의 소재를 SS400(Steel)에서 Aluminum 6061 T6로 변경하고 추가적인 중량 감소를 달성하기 위해 Altair 사의 Inspire을 이용하여 위상 최적화를 진행하였다. 페달 단품 해석과 페달 어셈블리 해석을 진행해 하중에 따른 변형과 안전율을 확인하면서 설계를 반복적으로 수정하였다.

1.2 해석

1.2.1 페달 위상최적화

먼저 페달의 밸런스바와 피벗 홀을 고려하여 sketch, slice, partition 기능 등을 활용해 Geometry를 수정하고 Design Space를 설정하였다. 다음으로, 재료를 Aluminum 6061 T6로 설정하고 하중이 가해지는 면적에 수직한 방향으로 2000N Force를, 밸런스바 홀과 Pivot 부분은 Z축 회전을 허용하는 Support를 부여했다. 또한, 가공방식과 가공비 절감을 고려하여 Shape Controls를 Extrusion으로 설정하였다.

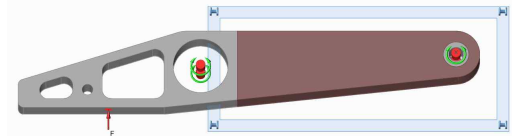


Fig. 3 페달의 Inspire 전처리 과정

최소 안전계수가 2 이상이고 최소 질량을 목적함수로 하는 Topology 최적화를 진행하였다. 해석결과와 제작의 간극을 줄이기 위해 polyNURBS Fit 기능 이용하여 CAD 파일로 변환한 형상을 바탕으로 페달을 설계하였으며 결과적으로 전년도의 380.0g 대비 179.5g으로 200.5g(53%)의 경량화를 진행할 수 있었다.



Fig. 4 페달의 Topology 최적화 결과

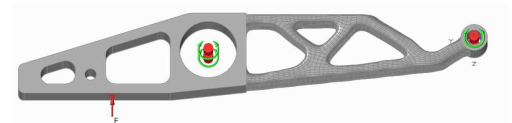


Fig. 5 최적화 페달 형상의 polyNURBS Fit

이어 구조해석을 진행한 결과 최대 변위는 0.2993mm, 최소 안전율은 2.2 이상으로 페달 전체 길이 대비 적은 변형률과 페달의 목표 최대 답력이 800N임을 고려하였을 때 충분한 안전계수로 안정성을 확인할 수 있었다.

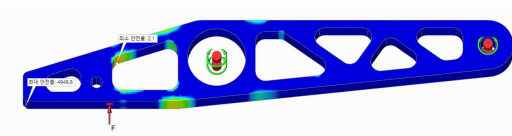


Fig. 6 페달의 구조해석 결과

1.2.2 전체 페달 어셈블리 해석

페달에 가해지는 하중이 전체 어셈블리에 전달되는 과정에서 최대 변위와 안전계수를 확인하여 모델의 안전성을 평가하고 페달 마운트와 레일의 두께를 결정하였다.

레일과 페달 마운트와의 접촉조건은 Fastener를 통해 고정하였고 페달의 Pivot 점과 같이 부싱이나 베어링이 연결되어 회전하는 지점은 Joint 기능을 이용하고 페달의 레일의 끝 양쪽 단면에 Fixed 조건을 부여하였으며 위와 동일하게 하중이 가해지는 면적에 수직 한 방향으로 2000N Force를 부여했다.

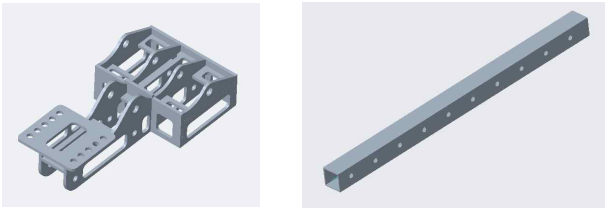


Fig. 7 페달 마운트와 레일 3D

여러 번 해석을 시도해보며 마운트 두께에 따른 안전성을 확인하였다. 페달 마운트의 경우 2000N 기준으로 최소 안전율이 1.5 이상이 되도록 반복 설계하였다. 또한 레일에 해석 결과를 반영하여 기존 25x25-t 사각파이프의 두께를 1.4mm로 줄여 경량화할 수 있었다.

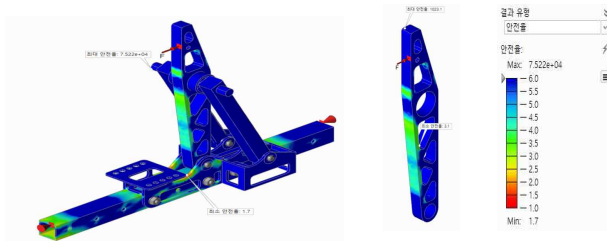


Fig. 8 전체 페달 어셈블리 구조해석 결과

	Fal-21	Fal-22
Assembly 형태	Box	Rail
고정 레일	324g	823.2g(+ 499.2g)
페달 마운트	1724.8g	1140g(-584.8g)
페달	380.0g	179.5g(-200.5g)
전체 Assembly	2428.8g	2142.7g (-286.1g)

결과적으로 2428.8g에서 2142.7g까지 286.1g 경량화할 수 있었으며 최소 안전율 1.7 이상으로 충분히 안전함을 확인할 수 있었다.

1.3 제작

페달은 CNC 가공으로 주문 제작, 레일은 각관 절단, 마운트는 레이저 커팅 후 각 부품들은 설계에 따라 볼트 체결하거나 용접하여 프레임에 설치하였다.

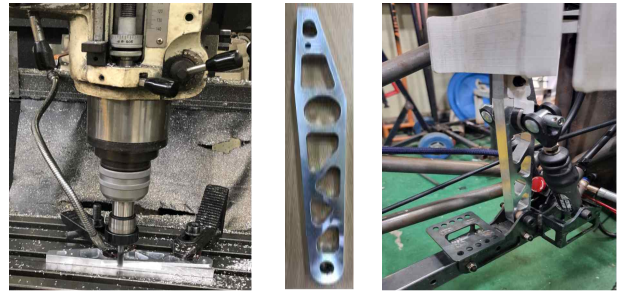


Fig. 9 페달 제작 과정 및 제작 결과

1.4 검증 및 Test 결과

2022년 7월 29일 KSAE 자작자동차 대회 Formula 부문 제동 Test 결과, 제동하는 과정에서 최대 압력을 가하였음에도 페달 Assembly 변형 없이 4개 휠 모두 제동이 잘 작동되었으므로 설계 및 제작 결과물의 실효성과 안전성을 검증할 수 있었다.



Fig. 10 제동 Test

1.5 원가 절감 사례

CNC Milling 가공의 특성상 장비 재정부 회수가 적을수록, 가공 시간이 짧은 형상일수록 가공 비용이 절감된다. 따라서 페달 Topology 최적화 시 압출 조건을 적용하여 CNC 가공에 있어 경제성이 높은 최적화를 진행할 수 있었다. 또한 곡선의 R 값이 크고 통일되어 있을수록 End mill 교체 시간과 가공 시간이 단축되므로, 제거되는 홀의 모서리를 R=5로 통일되도록 형상을 수정했다.

2. Undertray

2.1 설계

2.1.1 Undertray 설계 Target 값

		Fal-21	Target
Undertray	양력	-52 N	-100 N
	형상	가공 의뢰 필수	직접 가공 가능
Full car	양력	-8 N	-60 N
	항력	80.7 N	60 N
	양항비	-0.1	-1

Table 1. 설계 목표

2.1.2 초기 설계 과정

undertray는 비용적 측면과 제작 편의성을 중심으로 설계하였다. 몰드 가공비를 절감하고 핸드레이업 제작이 가능하도록 비교적 곡률이 적고 단순한 형상을 목표로 하였다. 차량의 전장, 전폭 및 타이어의 위치를 고려하여 총 길이 1673 mm, 엔진룸 throat 가로 길이 350 mm로 설정하였다. 베뉴리 효과를 적용하여 차량 하부의 압력이 감소하도록 설계하고, diffuser 끝단에서의 난류를 막아주는 gurney flap과 유동을 안내할 channel을 달아주었다.

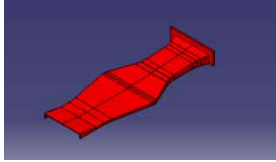


Fig. 1 undertray 초기 설계

throat-infuser 단면적비, infuser-diffuser 단면적비를 설계변수로 설정하고 HyperWorks CFD 및 HyperGraph를 이용하여 최적화 설계를 진행하였다.

2.2 해석

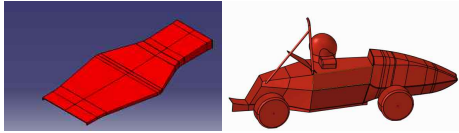


Fig. 2 throat 초기 설계(좌측), 단순화 model(우측)

throat 형상을 고정하고(Fig. 2) infuser와 diffuser의 설계를 반복하며 최적화를 진행하였다.

Surface mesh	size(average)	0.03
Boundary layer	first thickness	0.00028
	layer	12
Batch	size(average)	0.8

Table 2. Mesh condition

수렴성과 해석시간을 고려하여 효율적인 해석 진행을 위해 Table2와 같이 mesh를 설정하였다.

Body	No slip
Wheel	No slip
	Reference frame (108.29 rad/s)
Inlet	Constant (22.2 m/s)
Outlet	Outlet (대기압)
Ground	Moving (22.2 m/s)
대칭면	Symmetry
윗면, 옆면	Slip

Table 3. Boundary condition

전체적인 해석시간을 줄이기 위하여 model을 반으로 나누고 대칭을 넣어 해석을 실행하였다. 속력을 80 km/h로 설정하였으며, wheel의 회전에 의해 발생하는 유동을 고려하여 reference frame을 설정하였다.

2.2.1 throat-infuser 면적비 설정

throat와 infuser의 단면적비를 설계변수로 설정하고 해석을 진행했다. throat 단면적은 throat 시작점에서의 단면을 기준으로 하였다.

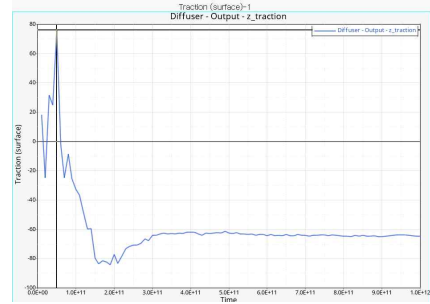


Fig. 3 infuser 1.9_hypergraph z-traction

Rate	1.3	1.5	1.7	1.9
Force	-58.2 N	-60.9 N	-62.6 N	-64.7 N

Table 4 throat-infuser면적비에 따른 양력생산량

infuser 단면적이 throat 단면적의 1.9배일 때 가장 큰 양력이 발생했다. 따라서 이 값을 고정하고 diffuser 설계를 진행하였다.

2.2.2 infuser-diffuser 면적비 설정

infuser와 diffuser의 단면적비를 설계변수로 설정하여 해석을 진행했다.

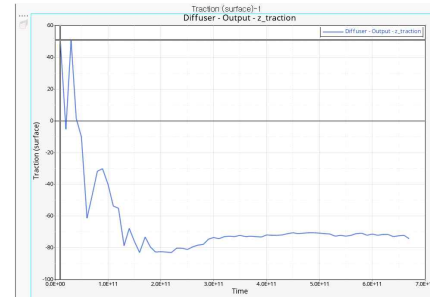


Fig. 4 diffuser 4_hypergraph z-traction

Rate	2	3	4	5
Force	-71.8 N	-73.1 N	-74.3 N	-72.0 N

Table 5 infuser-diffuser 면적비에 따른 양력생산량

diffuser 단면적이 throat 단면적의 4배일 때 가장 큰 양력이 발생했으므로 diffuser의 단면적이 infuser의 4배가 되도록 설계값을 고정하였다.

2.2.3 throat 형상 수정

2.1과 2.2의 과정을 통해 얻은 면적비를 적용했음에도 타겟값 달성에 어려움이 있어 부압이 작용하는 면적을 넓혀 더 큰 양력을 생산하도록 throat 형상을 수정했다.

2.2.4 throat 길이 수정

부압 작용 면적을 넓히기 위해 undertray의 총장을 고정하고 throat의 길이를 증가시킨다면 infuser와 diffuser의 길이가 짧아지면서 각도가 커지게 된다. 따라서 throat 길이에 따른 undertray의 양력 생산량을 보기 위해 infuser와 diffuser의 각도를 변수로 설정하고 해석을 진행하였다.

	Diffuser	13°	18°	20°
Infuser	10°	-60 N	-58 N	-56 N
	13°	-65 N	-45 N	-45 N

Table 6 infuser, diffuser각도에 따른 undertray 양력생산량

diffuser 각도가 커질수록 양력이 감소함을 보이는데, 그 이유는 다음과 같다.

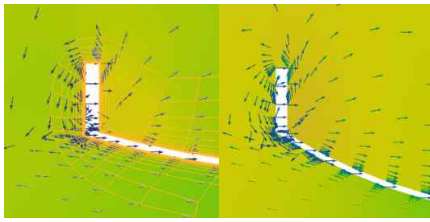


Fig. 5 diffuser 각도에 따른 유속 차이 (좌측 7°, 우측 18°)

좌측의 경우 diffuser에서의 유동이 정체되지 않고 빠른 유속을 유지하는 반면, 우측의 경우 유동이 gurney flap을 넘어 diffuser로 역류하며 undertray에서의 공기 유동을 방해한다. 기류 정체 구간이 발생하면서 상대적으로 높은 압력을 형성하므로 양력 생산량이 감소하게 된다.

따라서 길이를 늘린다면 diffuser의 각도가 커지면서 양력 생산량이 감소하므로(Table 4) throat의 너비를 수정하는 방안을 택하였다.

2.2.5 throat 너비 수정

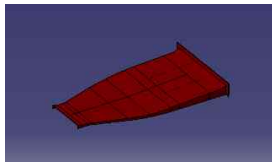


Fig. 6 최종 undertray 형상

frame과의 간섭을 고려하여 throat 너비를 450mm(28% 증가)로 수정하고 해석을 진행했다.

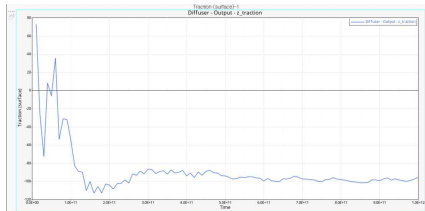


Fig. 7 undertray_hypergraph z-traction

Fig6에 따라 설계 undertray가 약 -100 N의 양력을 생산하였다. 최종적으로 undertray가 타겟값에 도달함을 확인하였다.

		목표값	해석값
Full car	Undertray	양력	-100 N
	Full car	양력	-60 N
		항력	60 N
		양항비	-1

Table 7 목표값-해석값 비교

2.3 제작

undertray 몰드는 설계 목표에 따라 직접 제작하였다. 레이저 컷 가공한 ss400 판재를 이용해 아이소핑크를 재단하여 몰드의 형상을 구현하였다. 스티폼의 표면이 고르지 못하다면 실제 유동에 악영향을 줄 수 있으므로 알루미늄 테이프와 사포를 이용해 표면처리를 해주었다.

undertray의 재료는 경량화를 위하여 GFRP에 비해 가볍고 높은 강도를 가지는 CFRP로 선정하였다. 또한 undertray의 굴곡이 적기 때문에, 드래이프에 유리한 능직보다 튼튼한 직조페턴을 가지는 평직을 사용하였다. 3K-12K-3K 순으로 3 layer 적층하여 강도를 확보한 undertray를 제작했다.



Fig. 8 undertray 몰드 제작 과정

2.4 검증, Test 결과

설계한 undertray 장착한 단순화 모델을 소형으로 제작하여 검증을 진행하려고 했으나 풍동장치와 같은 장비의 부족으로 진행하지 못하였다.

2.5 원가 절감 사례

올해 차량은 공력장치 제작에 있어서 작년 대비 64.68%의 제작비용을 절감했다. 후원 받은 아이소핑크를 이용해 undertray 몰드를 직접 제작함으로써 CNC 몰드 가공 외주 지출이 감소하였으며, 경량화를 위해 공력장치를 최소화하여 제작 비용을 크게 줄일 수 있었다.

III 결론

이번 HyperWorks CFD & Graph와 Inspire프로그램을 이용한 최적 설계를 통하여 브레이크 페달 시스템의 경량화를 이루었으며 공력 장치에 해당하는 undertray의 경우 목표하는 양력값에 도달하게끔 설계하였다.

- 전체 페달 어셈블리 무게 2428.8g에서 2142.7g까지 약 13.4% 경량화
- 2000N이 페달에 가해질 때 안전율 1.7 이상으로 충분한 안전성 확보
- undertray의 양력이 -100 N으로 향상되어 양력 6.85배 증가
- 양항비 작년 -0.1에서 올해 -1.2로 개선

앞으로 지속적인 테스트 주행을 통하여 차량을 보완하고 안정화할 것이다.

또한 올해 진행하지 못한 Inspire motion을 활용한 벨크랭크 최적설계와 Motion Solve를 활용한 다물체 동역학 해석을 진행하여 서스펜션 지오메트리의 최적설계를 이루고자 한다.

IV. 참고문헌

- 1) Aerodynamic Package FSAE: Summary Report / Tyler R. Bosch
- 2) Design and optimization of undertray for FORMULA SAE RACE CAR using CFD Analysis / Girish Bangalore Jalappa
- 3) Design & Development of an Aero Dynamic Package for a FSAE RACE CAR / Ioannis Oxyzoglu
- 4) Design of hydraulic breaking system of anfsae car / Harsh Patel, Sanchita Sheth, Honeykumar Vishwakarma
- 5) 차량 운동 성능과 Chassis mechanism_brake / 우노 타카야키
- 5) Fundamentals of Materials Science and Engineering / William D. Callister, Jr. / David G. Rethwisch
- 6) Dynamics / J.L. Meriam, L.G. Kraige, J.N. Bolton