

# 2019 대학생 자작자동차대회 Altair Design Award 보고서



<b>학교명</b>	한국항공대학교	<b>팀명</b>	KAUVOY1
<b>차량번호</b>	85	<b>팀장</b>	윤태호
<b>차량</b>	<b>이름</b>	BIKIRA	
	<b>제원</b>	전장 2330mm × 전폭 1470mm × 전고 1420mm (무게 260kg)	

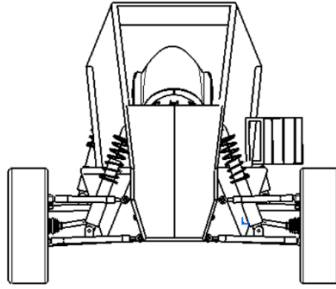
상기 참가팀은 2019 대학생 자작자동차대회의 Altair Design Award 부문 보고서를 다음과 같이 제출합니다.

2019 년      8 월      1 일

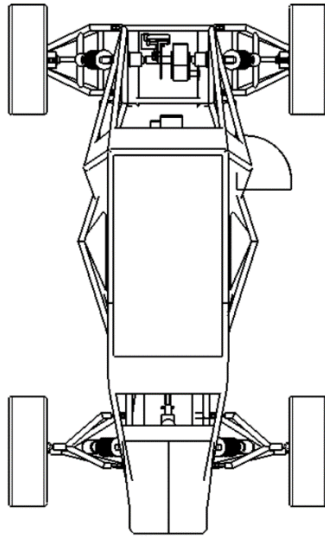
대학생 자작자동차대회 조직위원회 귀중

# 1. 도면

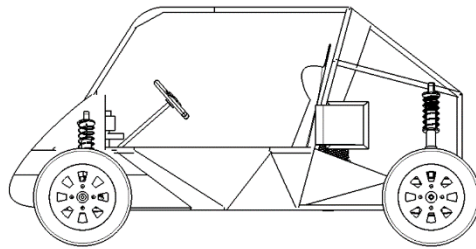
## 1) 정면도



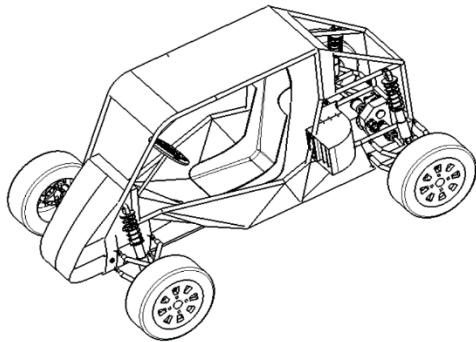
## 2) 평면도



## 3) 측면도



## 4) Isometric view



# CAE를 활용한 BAJA 차량 설계 및 제작

김영태, 박중후, 윤태호, 이대준, 이훈영, 조상연

한국항공대학교 Team KAUVVOY

## 요약

KSAE 자작자동차 대회의 Baja 부분 출전을 위해 세가지의 설계 목표를 설정하였다. 첫째, 차체, 사시, 파워트레인 등을 강성, 내구, 동적 거동, 공력 등의 자동차 성능을 발휘할 수 있도록 공학적인 근거를 가지고 설계한다. 둘째, 자동차를 구성하는 구성 요소들이 성능을 발휘하되 최적설계를 통해 차량의 무게를 최대한 줄일 수 있도록 한다. 셋째, 설계과정을 통하여 CAE를 적극적으로 활용한다. 본 보고서에서는 Baja 차량의 설계와 제작 과정에서 수행한 주요 CAE를 활용한 설계 내용을 기술하였다.

## I. 서론

작년과는 달리 올해 제작한 차량은 면밀한 설계와 다양한 프로그램을 활용하여 해석을 진행하였다. CAE를 이용하여 설계한 결과 프레임의 비틀림 강성을 작년 제작한 차량보다 개선을 시킬 수 있었다. 작년 차량 같은 경우 Suspension Geometry 설계를 전혀 진행하지 않아 차량의 주행 특성을 전혀 이해하지 못한 채 대회를 출전하였지만 올해 제작한 차량의 경우 Suspension Geometry 해석을 통해 차량의 주행 특성을 파악할 수 있었으며 대회 환경에 적합한 차량 제작이 가능하였다. 위상 최적화를 통해 차량의 부품의 경량화 및 최적화를 진행하여 구조적으로 안전하면서 공학적으로 신뢰성이 있는 제품을 제작하였다. Acusolve를 활용하여 유동해석을 진행하여 신뢰성을 갖춘 Air Duct의 설계가 가능하였다. 차량의 항력을 개선시키는 동시에 해석결과로 구할 수 있는 유선을 통해 Air Duct와 라디에이터의 설치 위치를 효율적으로 선정할 수 있었다. CAE를 활용하여 차량을 제작한 결과 차량의 성능을 개선함과 동시에 제작 시 시행착오를 줄일 수 있어 제작 시간 또한 크게 줄일 수 있었으며, 오작동의 빈도 또한 줄여서 차량의 신뢰도를 크게 향상시킬 수 있었다.

## II. 본론

### 1. Chassis

#### 1.1 Roll Cage

Roll-Cage의 설계에는 비틀림 강성과 Modal Analysis에 의한 동적 강성이 고려되었다. 우선 초기 모델의 강성을 평가하고 Strain Energy 패턴을 관찰하여 강성 보강 방안을 도출하였다.

##### 1.1.1 초기모델 구성 및 평가

대회 규정에 부합하며 운전석, 장착되는 각종 부품들을 고려하여 롤케이지의 초기 모델을 완성하였다. 해석 모델을 위해 Trias와 Quad shell 요소를 사용하였고, 요소의 수는 257730개였다. 이에 사용된 재료는 steel로써 탄성계수 205Gpa, 포아송비 0.3, 밀도는  $7850\text{kg}/\text{m}^3$ 였다. 초기 모델의 무게는 약 36.78kg으로 계산되었다.

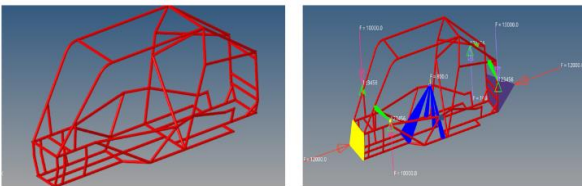


Fig 1. 초기모델 및 Loading Condition

##### 1.1.2 초기모델 Linear Static Analysis 및 Modal Analysis

Hyperworks Optistruct를 활용하여 linear static 해석을 진행하였다. Load Case는 Front Torsion, Rear Torsion, 두 가지 상황으로 분류하여 해석을 진행하였다. Static Analysis를 진행하기 위해 Load Case 별 하중은 Table 1과 같은 가정을 바탕으로 계산이 되었다.

차량 무게 $m_v$	240kg
운전자 무게 $m_d$	60kg
시트 무게 $m_s$	20kg
속도 $v$	80km/h
방지턱의 반경 $r$	4m

Table 1. 하중 계산 조건

다음은 강성 평가를 위한 Bump Force 계산식이다.

$$F_{Bump} = \frac{(m_v + m_d) \times v^2}{r} + \frac{(m_v + m_d)}{4} \times 9.81 \approx 10000N$$

\* 팀장: 윤태호 Email: xogh1808@gmail.com

다음은 초기 모델의 해석결과이다.

Load Case	Maximum Displacement
Torsional(front)	0.207rad
Torsional(rear)	0.191rad
$n^{th}$ mode	Frequency (Hz)
1 <sup>st</sup>	30

Table 2. 초기모델 해석결과

Idling 상태에서의 엔진은 1200rpm으로 운동하고 있으며 이때 엔진에서 한 Cycle마다 가진 되는 주파수는 식(1)와 같은 가정을 하였다.

$$1200 \div 60 = 20\text{Hz} \quad (1)$$

공진주파수의 대역폭을 공진 주파수에  $\sqrt{2}$ 를 나눈 값으로 정의하면 1차 모드 대역폭의 최소값은 다음과 같다.

$$31 \div \sqrt{2} = 21.92\text{Hz} \quad (2)$$

결과적으로 가진 주파수가 공진주파수 대역폭의 최소값보다 작기 때문에 idling 상태에서의 공진을 회피했다고 판단하였다.

##### 1.1.3 보강 아이디어

초기 모델의 Load Case에 따른 변형 에너지를 바탕으로 보강 방안을 도출하였다. Fig 2,3,4,5는 각각 다른 보강 아이디어를 보여주고 있다.

- 1) 첫번째 아이디어: 변형에너지를 바탕으로 프레임의 전반적인 부분을 steel pipe로 보강
- 2) 두번째 아이디어: 보강 부분을 steel plate로 보강
- 3) 세번째 아이디어: 차량의 윗부분에 steel pipe로 가로대를 설치
- 4) 네번째 아이디어: 세번째 아이디어 + 앞, 뒷면 보강

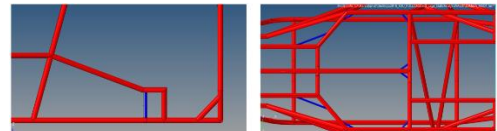


Fig 2. 보강 아이디어1

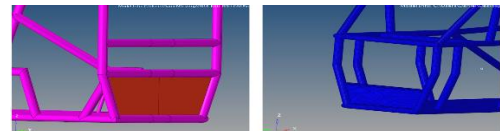


Fig 3. 보강 아이디어2

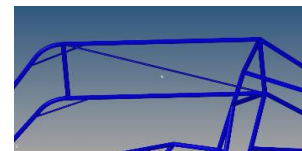


Fig 4. 보강 아이디어3

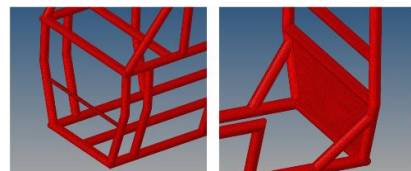


Fig 5. 보강 아이디어4

### 1.1.4 최적화 과정

Table 3은 도출된 보강 아이디어를 반영하여 해석을 한 결과 아이디어 별 비틀림 강성의 개선 효과와 무게 증가를 나타내는 표이다.

보강 방안	비틀림 강성 증가율	효과	무게
1	Front: 6.2% / Rear: 1.2%	x	+ 0.5kg
2	Front: 8.2% / Rear: 7.3%	△	+ 1.9kg
3	Front: 19.3% / Rear: 21.5%	◎	+ 0.9kg
4	Front: 20.7% / Rear: 21.9%	○	+ 1.6kg

Table 3. 보강 아이디어 평가

결과적으로 보강방안 4번이 강성에 있어 가장 큰 개선을 보였지만 무게 증가에 비해 강성 증가가 적은 관계로 가장 효율적인 보강 방안 3번을 채택하였다.

### 1.1.5 최종 보강 모델

보강 아이디어를 바탕으로 최종 보강 모델을 도출하였으며 Linear Static 해석 결과는 Table 4과 같다.

Load Case	Maximum Displacement	Improvement
Torsional(front)	0.167rad	19.3%
Torsional(rear)	0.150rad	21.5%
$n^{th}$ mode	Frequency (Hz)	
1 <sup>st</sup>	31	

Table 4. 최종모델 Linear Static Analysis

Roll Cage의 비틀림 강성이 초기대비 19.3%, 21.5% 개선되는 결과를 얻을 수 있었으며 무게는 37.7kg으로 측정되었으며 초기모델에 비해 무게가 2.5% 증가하였다.

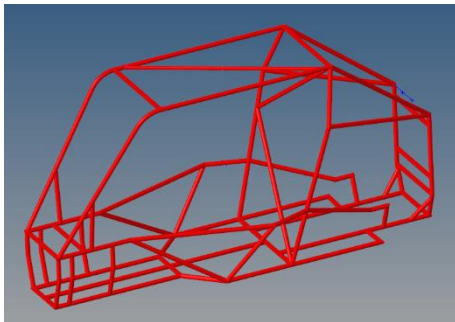


Fig 6. 최종 모델

## 1.2. Suspension Geometry

Baja 차량의 경우 오프로드 주행조건에 만족을 해야 하므로 차량이 Bump 와 Jounce 상황이 놓여져 있을 시 Camber 손실을 최소화할 수 있는 Suspension Geometry가 요구된다. Altair사의 Motionview를 활용하여 해석을 진행하였다.

### 1.2.1 초기 Suspension Geometry

작년에 제작한 차량의 Suspension Geometry를 바탕으로 초기 모델을 선정하여 해석을 진행하였다.

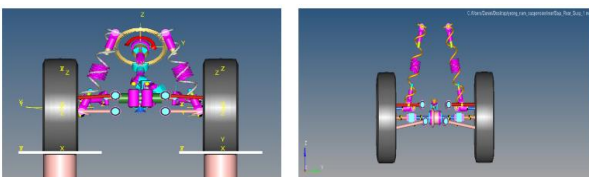


Fig 7. 작년차량 Front & Rear Suspension Geometry

	Bump	Jounce	Camber Change
Front	80mm	80mm	-4.5°~3.2°
Rear	80mm	80mm	-3.8°~3.1°

Table 5. 기존차량모델 해석결과

### 1.2.2 Suspension Geometry 설계과정

기존 Track Width 보다 220mm 증가시켜 upper 와 Lower Arm의 길이를 증가시켰으며 Upper 와 Lower Arm을 평행하게 설정함과 동시에 최저지상고를 100mm 낮추었다. 그리고 Tie Rod와 Upper, Lower Arm의 연장선이 한곳에 만나도록 하여 Bump Steer가 발생하지 않도록 하는 Geometry를 설계하였다.

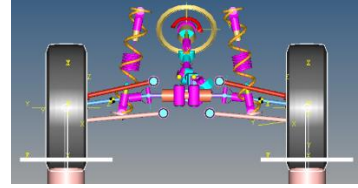


Fig 8. 초기모델 Front Suspension Geometry

	Bump	Jounce	Camber Change
Front	80mm	80mm	-8°~4°

Table 6. 초기모델 해석결과

Camber Loss를 추가적으로 줄이기 위해 Lower Arm을 고정한체 Knuckle 부분의 Upper Ball Joint 점을 10mm 높게 위치시켜 최종 모델을 설계하였다. Rear Suspension Geometry의 경우 Front보다 고려할 요소가 적고 상하 운동시 Camber Loss를 최소화하기 위해 Upper Arm과 Lower Arm이 최대한 평행에 가깝게 설계를 하였다.

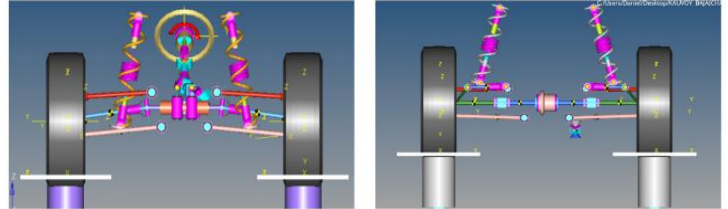


Fig 9. Front & Rear Suspension Geometry

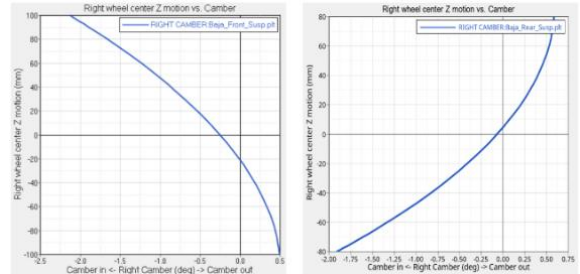


Fig 10. Front & Rear Camber Angle Diagram

	Bump	Jounce	Camber Change
Front	80mm	80mm	-1.8°~0.45°
Rear	80mm	80mm	-1.8°~0.6°

Table 7. 최종모델 해석결과

결과적으로 앞부분의 Camber Loss를 70.7% 개선시켰으며 뒷부분의 Camber Loss는 65.21% 개선시켰다. Upper와 Lower Arm이 평행일수록 Camber Loss는 좋아지지만 Roll Center와 무게중심 간의 거리가 멀어져 Roll Moment가 증가하게 된다. 이를 보완하기 위해서 최저지상고를 낮춰 무게중심 점을 아래로 내렸다.

## 2. Powertrain

### 2.1 Gear Box Bracket

#### 2.1.1 Topology Optimization

본 차량에서 사용되는 기어박스 브라켓을 가볍게 설계함과 동시에 주행 도중 변형이나 파단이 일어나지 않도록 하는 브라켓을 제작하기 위해 Altair사의 Inspire 프로그램을 활용하여 위상최적화를 진행하였다.

#### 2.1.2 Loading Condition

기어박스 브라켓에 작용하는 하중을 크게 기어박스에 의한 베어링 반력과 기어박스 자중에 의한 힘으로 나누어 하중 값을 구하였다.

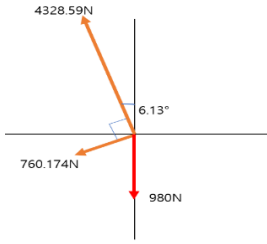


Fig 11. 계산된 하중의 크기

### 2.1.3 Design Process

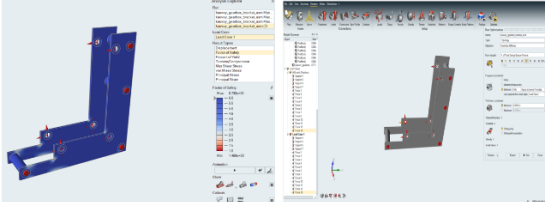


Fig 12. 초기모델 및 구조해석 결과



Fig 13. 20% Target Design Space



Fig 14. 50% Target Design Space

초기모델의 최소 S.F 가 4.5 이며 대부분의 영역의 S.F 가 6 으로 나와 경량화를 진행하였다. 위상최적화는 강성을 최대화를 목표로 진행하였다. 우선 Design Space 영역의 20%만 남겨두고 위상최적화를 진행한결과는 Fig 13 과 같으며 육안으로만 봐도 상당히 구조가 얇고 불안한 형상을 띄고 있었으며 구조해석 결과 S.F 가 1.5 이하인 부분이 상당히 넓었다. Fig 14 은 50%의 Design Space 영역으로 위상최적화를 한 결과이며 구조는 안정되어 보이지만 구조해석 결과 최소 S.F 가 3 으로 나와 Design Space 를 추가적으로 줄여도 된다는 판단을 하였다. 최종적으로 Design Space 영역의 부피 30%만 남겨두고 제거하는 위상최적화를 진행하였다.

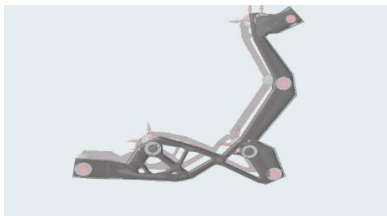


Fig 15. 위상최적화 된 기어박스 브라켓

Polynurbs 기능을 활용하여 제작가능한 형태로 모델링을 진행하였다. 구조 해석을 한 결과 최소 S.F 가 2 로 나왔으며 무게는 초기에 2.04kg 에서 최적화 후 1.20kg 으로 약 0.84kg 감량할 수 있었다.



Fig 16. 기어박스 브라켓 구조해석

## 2.2 Cooling System

### 2.2.1 Air Duct

작년 차량 같은 경우 내구 레이스 도중 엔진이 과열되어 차량에 문제가 생긴 경험을 바탕으로 올해 대회 출전 차량에는 엔진 냉각을 위해 Air Duct 의 최적 설계를 진행하였다. 해석을 Altair 사의 Acusolve 를 활용하였다.

### 2.2.2 초기 모델

CAD 파일을 바탕으로 원하는 위치에 대략적인 Air Duct 의 형상을 모델링 하였다.

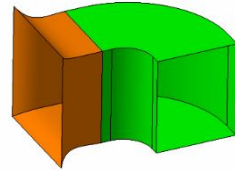


Fig 17. Air Duct 초기 모델

### 2.2.3 개선모델

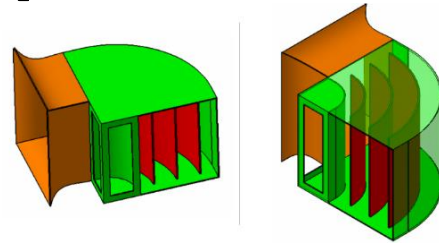


Fig 18. Air Duct 개선 모델

기존 Air Duct 모델에 베인(vane)을 추가하였다.

### 2.2.4 해석

해석 조건은 Inlet 에서 시속 40km/h 로 공기가 들어오고 Outlet 에서의 압력은 Inlet 과 Outlet 모두 대기압 상태 이므로 0 으로 선정하였다.

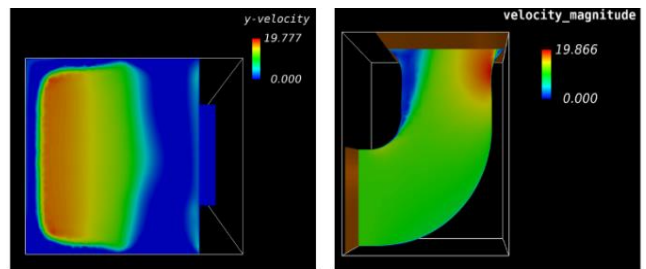


Fig 19. 초기모델의 출구에서의 속도분포 및 Duct 내부에서의 속도 분포

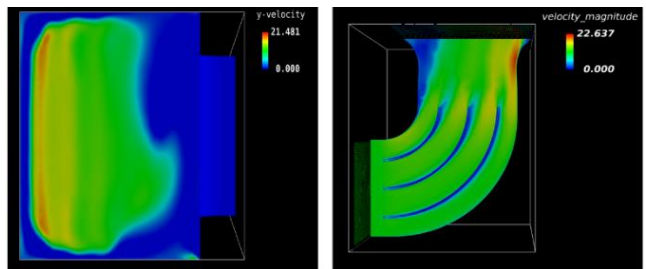


Fig 20. 개선모델의 출구에서의 속도분포 및 Duct 내부에서의 속도 분포

해석결과 Fig 19, Fig 20 에서 알 수 있듯이, 베인(vane)을 설치한 Air Duct 에서 토출되는 공기의 유속이 초기 모델보다 균일하게 나타나며 개선모델의 Air Duct 내부에서의 속도분포가 더 균일한 것을 알 수 있다. 즉, 유체가 고르게 토출되므로 출구에서의 와류의 생성이 적다. Fig 15 와 Fig 16 은 Air Duct 의 압력 분포를 나타내고있으며 개선모델의 압력분포가 더 균일한 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 베인(vane)을 설치한 Air Duct 의 성능이 초기모델보다 우수하다.



### 3. Aerodynamics

작년차량 경우 프레임 간의 빈 공간을 막기 위해 아무런 공학적인 해석을 진행하지 않고 차량의 외형을 제작하였다. 올해 대회 출전 차량은 작년과는 달리 차량 외형 설계를 Altair사의 Virtual Wind Tunnel을 활용하여 차량의 성능을 개선시키는 설계를 진행하였다. Baja 부분의 경우 주행거리가 약 120km 정도 되며 평균 주행 속도가 시속 40-50km 이므로 차량이 주행 시 차량의 표면에 작용하는 압력을 감소시키는 설계를 실시하였다.

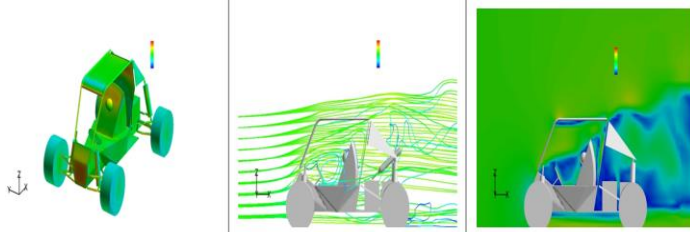


Fig 21. 초기모델의 속도분포 및 압력분포

Simulation Type	Transient
Element Count	1851403
Inlet Velocity	14m/s
Drag Coefficient	1.369

Table 8. 초기모델 해석결과

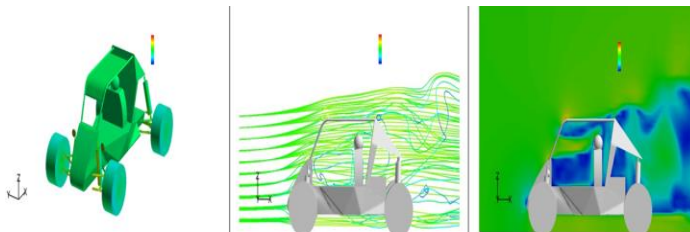


Fig 22. 개선모델의 속도분포 및 압력분포

Simulation Type	Transient
Element Count	1851403
Inlet Velocity	14m/s
Drag Coefficient	1.337

Table 9. 개선모델 해석결과

공력 해석을 통해 약 2.33%의 항력계수를 개선시켰으며 차량의 기본적인 형상이 대회규정으로 정해져 있는 관계로 항력계수의 큰 개선은 이루기는 어려웠다.

### 4. 제작

#### 4.1 지그를 활용한 프레임 및 에이 암 제작

설계된 Roll Cage 와 Suspension Geometry 를 제작하기 위해 지그를 직접 제작하여 용접 시 발생하는 열변형을 최소화하며 제품을 완성하였다.

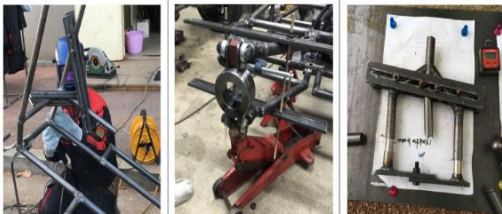


Photo 1. 지그를 활용한 차량 제작

#### 4.2 Gear Box Bracket

도면 작업 후 레이저 커팅을 활용하여 위상 최적화된 기어박스 브라켓을 제작하였다.

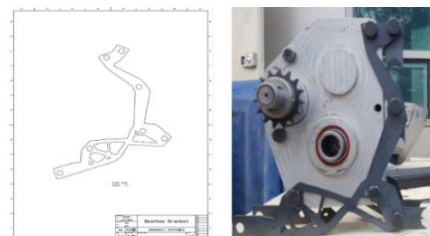


Photo 2. 기어박스 도면 및 실제 제품

#### 4.3 Air Duct

신속조형기술인 3D printing 을 활용하여 Air Duct 를 제작하였다.

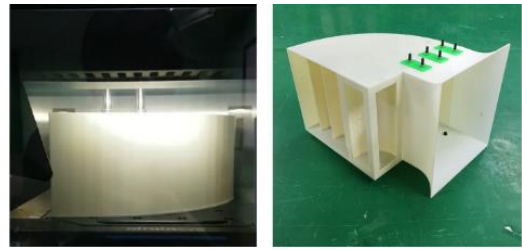


Photo 3. Air Duct 3D프린팅

### 5. 원가 절감 사례

#### 5.1 위상 최적화 제품 레이저 컷

Inspire 로 위상최적화를 진행한 제품은 복잡한 형상을 띄고 있다. 따라서 정확하고 만족스러운 품질의 제품을 얻기 위해 주물공정, 판재 성형가공, 레이저 커팅을 활용한 가공을 고려를 하였다. 주물공정과 판재 성형가공은 대량 생산에는 유리하지만 주형 및 금형이 요구되는 공정이므로 비용이 많이 발생하게 된다. 반면에 레이저 커팅의 경우 소량생산에 유리하고 비용이 저렴하여 양질의 제품을 적은 비용을 통해 제작할 수 있었다. 레이저 커팅을 활용하여 기어박스 브라켓을 제작한 결과 제품 한 개 당 2만원의 비용이 발생하였다.

#### 5.2 Air duct 제작 시 3D printing 사용

면밀한 해석을 통해 설계된 Air Duct 를 제작하는 데 있어 만약 수작업으로 직접 제작을 한다면 비용이 절감되지만 정확한 제품 제작이 불가능하다고 판단하였다. 판재 성형가공 후 용접 또는 소실모형공정은 대량생산에 비해 소량생산에 적합한 기계가공이기때문에 부적합하다고 판단하여 신속조형기술인 3D 프린팅을 활용하여 정확한 제품 제작과 단가를 크게 줄일 수 있었다. Air Duct 를 3D printing 한 결과 7만원의 제작비용이 발생하였다.

### III. 결론

Baja 출전 차량의 설계에 CAE를 활용함으로써 신뢰성 있는 설계가 가능하였고, 제작상의 시행 착오를 줄여서 제작 비용과 시간을 절약할 수 있었다. CAE 검토를 위해 Altair사의 Hyperworks Optistruct, Motionview, Acusolve를 사용하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

- Roll Cage의 강성을 초기 설계에 비해 19.3%~21.5% 향상시킴
- 위상 최적화 기법을 이용하여 초기 무게 대비 41.2% 감량한 Gear Box Mounting 브라켓을 설계함
- Suspension Geometry의 변경에 의해 Camber의 변화를 67% 향상시킴
- 엔진 과열 방지를 위한 Air Duct를 구상하였고 안정적으 엔진 주위에 공기 흐름을 유도함
- 최적화된 브라켓과 Air-Duct의 제작을 위해 레이저 컷과 3D프린팅이 사용하였고, 제작 원가를 절감하는 효과를 가져옴

CAE를 활용하여 많은 설계 개선 효과를 얻을 수는 있었지만, 검토된 정 강성, 동 강성, 공력 등에 평가 기준을 가지고 있지 못해 최적화 설계에 어려움이 있었다. CAE를 꾸준히 진행하고, 차량 시험의 결과와 비교함으로써 평가 기준을 확립해 나가겠다.

### IV. 참고문헌

- (1) Barry J. Goodno, James M. Gere, 2017 Mechanics of Materials, Cengage Learning, 9<sup>th</sup> edition
- (2) William F.Riley, Leroy D.Sturges, Engineering Mechanics: Dynamics, Wiley, , 2<sup>nd</sup> edition
- (3) William F.Milliken , Douglas L.Milliken, Race Car Vehicle Dynamics, SAE International
- (4) Inman, Daniel J, 2014, Engineering Vibration, Prentice Hall, 4<sup>th</sup> edition
- (5) Cengel,Cimbala, 2018, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw Hill, , 3<sup>rd</sup> edition
- (6) Serope Kalpakjian, Steven Schmid, 2014, Manufacturing Processes for Engineering Materials, Prentice Hall, 5<sup>th</sup>
- (7) 이공희, 윤의열, 전희호, 이승준. (2017). CFD해석을 통한 직관덕트와 주름덕트의 공기 유통성능에 관한 연구. 대한기계학회 춘추학술대회