

# Optimal Design for Improving Drag and Cooling Performance of KSAE E-Mobility through CFD Analysis

School of Mechanical and Control Engineering  
Handong Global University

Gyeon-Heal An

# Optimal Design for Improving Drag and Cooling Performance of KSAE E-Mobility through CFD Analysis

A Bachelor's Thesis

Submitted to the School of  
Mechanical and Control Engineering of  
Handong Global University

Gyeon-Heal An

June 2024

This certifies that the bachelor's thesis is approved.



---

Thesis Advisor: Ph.D. Chong-Sun Lee



---

The Dean of Faculty: Ph.D. Chong-Sun Lee

School of Mechanical and Control Engineering

Handong Global University

June 2024

## Extended Abstract

# Optimal Design for Improving Drag and Cooling Performance of KSAE E-Mobility through CFD Analysis

This research focuses on optimizing the design of an electric vehicle for the KSAE (Korea Society of Automotive Engineers) student competition using Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis. The primary objectives are to reduce aerodynamic drag and enhance the cooling performance of the vehicle's electronic components.

The existing vehicle design from the 2023 KSAE E-Mobility competition was found to have high drag due to its large frontal area and sharp edges. Additionally, the vehicle's electronic components lacked effective cooling. To address these issues, this study utilized Ansys Fluent for CFD analysis to propose an improved vehicle design. The validity of the CFD results was verified through wind tunnel experiments.

Drag force ( $F_D$ ) is influenced by the projected area in the direction of fluid flow ( $A$ ), fluid velocity ( $v^2$ ), and the drag coefficient ( $C_D$ ). The equation  $F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A$  was used to calculate the drag force, where  $\rho$  is the fluid density. The design aimed to minimize the drag coefficient  $C_D$  by making the vehicle more streamlined and reducing the projected area ( $A$ ).

The research involved analyzing the current vehicle model and proposing two new designs. The first design maintained the original frame while altering the shape of the cowling. The second design modified the frame to lower the vehicle's height and used a streamlined shape based on the NACA airfoil profiles. The redesigned models were evaluated through CFD simulations to measure drag and cooling performance.

Wind tunnel experiments were conducted to verify the CFD results. The wind tunnel settings adjusted the fan speed to 25Hz, 30Hz, and 35Hz to measure the wind speeds and compare the drag forces of the existing model and the two improved models. The results showed that the improved models had lower drag values than the original design, with the second improved model significantly enhancing the cooling performance of the electronic components.

The CFD analysis showed significant improvements. The first improved model reduced the drag coefficient by 17%, while the second model achieved a 21% reduction. Both models also demonstrated

enhanced cooling performance, with the second model allowing air to flow more effectively over the rear electronic components, increasing cooling efficiency.

In conclusion, the final model optimized through CFD analysis and validated by wind tunnel experiments reduced the drag force from 245 N to 140 N and the drag coefficient from 1.24 to 0.98, indicating a substantial improvement in aerodynamic performance. This study successfully developed an optimized electric vehicle design for the KSAE competition, significantly improving both aerodynamic efficiency and cooling performance.

# 차 례

<b>Extended Abstract</b>	.....	<b>i</b>
<b>I. 서론</b>	.....	<b>1</b>
<b>1.1. 연구 배경</b>	.....	1
<b>1.2. 연구 목표</b>	.....	2
<b>II. 차량 분석 및 모델링</b>	.....	<b>3</b>
<b>2.1. 기존 모델 분석</b>	.....	3
<b>2.2. 모델 설계</b>	.....	5
2.2.1. 개선 모델 1	.....	5
2.2.2. 개선 모델 2	.....	6
<b>2.3. 모델 비교</b>	.....	8
<b>III. CFD Simulation</b>	.....	<b>9</b>
<b>3.1. 메쉬 조건</b>	.....	9
<b>3.2. 경계 조건과 난류 모델</b>	.....	11
<b>IV. 풍동 실험</b>	.....	<b>12</b>
<b>4.1. 실험 목표</b>	.....	12
<b>4.2. 실험 설계 및 방법</b>	.....	12
<b>V. 결과</b>	.....	<b>14</b>
<b>5.1. 시뮬레이션 결과</b>	.....	14

5.1.1 Drag Performance	14
5.1.2 Cooling Performance	15
<b>5.2. 풍동 실험 결과</b>	<b>16</b>
 <b>VI. 논의</b>	 <b>18</b>
 <b>VII. 결론</b>	 <b>19</b>
 참고문헌	 <b>20</b>
 부록	 <b>21</b>

# I. 서 론

## 1.1. 연구 배경

자동차 경주는 전 세계적으로 인기를 끌고 있으며, 특히 미국 캘리포니아와 멕시코 Baja California 지역에서 시작된 오프로드 경주는 차량 성능을 시험하며 기술 발전에 기여해왔고, 이를 바탕으로 미국자동차공학회(SAE)는 "Baja" 대학생 자작자동차대회를 주최하여 성공을 거두었으며, 이는 Formula Student(영국), FSAE(미국)와 같은 유사한 대회들로 확산되었다.

최근 전기자동차 및 하이브리드 자동차 대회가 추가되면서, 자동차 공학의 새로운 분야로의 확장이 이루어지고 있다. 이러한 대회들은 학생들이 최신 기술을 습득하고, 창의적인 문제 해결 능력을 기를 수 있는 기회를 제공하며, 미래 자동차 산업의 전문가를 육성하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

한국자동차공학회(KSAE)도 이러한 흐름에 맞춰, 2007년부터 매년 대학생 자작자동차대회를 개최하고 있다. 이 대회는 국내 최대 규모와 참가팀을 자랑하며, 학생들이 직접 자동차를 설계하고 제작하는 기술을 습득하는 기회를 제공하고 있다. 또한, KSAE는 매년 전기 자동차 주행 대회를 주최하여 전기 자동차에 대한 관심을 고취하고, 기술적 전문성을 가진 엔지니어를 육성하고 있다.

차량의 공기역학적 디자인은 연비 향상, 고속 주행 안정성, 배출가스 감소 등에 중요한 영향을 미친다. 특히 전기차의 경우, 효율적인 공기역학적 설계는 주행 거리를 늘리고 배터리 효율성을 극대화하는 데 필수적이다. 공기역학적 디자인은 차량이 공기 저항을 최소화하고 냉각 성능을 최적화하여, 전체 성능을 향상시키는 데 중요한 역할을 한다.

## 1.2. 연구 목표

본 논문은 KSAE(대학생 자작 전기차 대회) 출전용 전기 자동차의 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 차량의 항력 감소와 전자 회로의 냉각 효과 증진을 목적으로 한다. 기존 차량의 디자인은 높은 항력을 받는 구조이며 전자회로의 효과적인

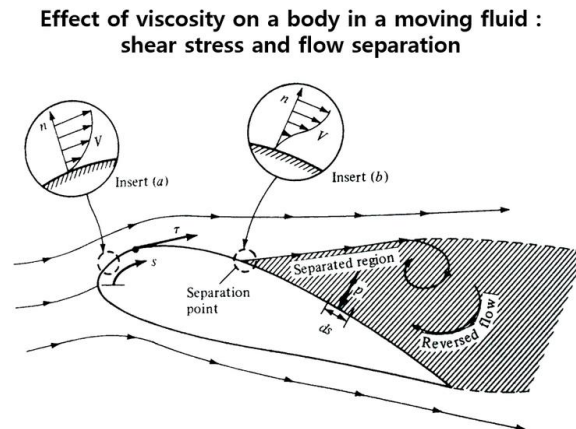


냉각이 이루어지지 않는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Ansys Fluent 를 활용하여 항력을 최소화하는 동시에 전자 회로의 냉각을 개선한 모델을 제시하며 풍동 실험을 통해 CFD 해석 결과의 신뢰성을 검증하고자 한다.

차량의 항력( $F_D$ )을 결정하는 중요한 요소는 (1)식과 같이 유체 진행방향의 투영 면적( $A$ ), 유체의 속도( $v^2$ ), 형상에 의한 항력 계수( $C_D$ )이다.

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

유체의 점성 성분으로 인해 물체의 표면에는 ‘Boundary Layer’ 가 생성된다. Boundary Layer 에는 점성으로 인한 유체의 마찰 전단 응력으로 인해 표면이 유체를 끌어당기는 ‘순압력구배’ 현상이 일어난다. 그러나 물체의 표면 형상이 급격하게 변화하는 경우 ‘유동 박리’ 현상에 의해 물체 후방 Boundary Layer 의 유체 흐름이 ‘박리점’ 을 지나 ‘역압력구배’ 를 겪게 되면 표면의 전단응력이 0 이 되며 유체의 속도가 반대 방향으로 커지며 압력은 낮아지고 소용돌이인 와류가 형성된다. 결과적으로 전방과 후방의 압력차이로 인해 항력이 생성된다.



**Figure 1. Airfoil의 유동 박리 현상**

따라서 유동 박리 현상을 최소화하기 위해 차량을 유선형으로 설계하여 항력 계수( $C_D$ )를 낮추고 투영 면적( $A$ )을 작게 만들어 항력을 최소화하는 것을 목표로 하였다.

## II. 차량 분석 및 모델링

차량의 항력 감소와 전자 장치 냉각 효과를 개선하기 위해 기존 차량의 디자인을 분석하고 문제점을 찾아 보완하여 새로운 모델을 설계하였다. 작년 대회에서 사용했던 자동차의 3D 모델을 기반으로 설계를 진행하였으며 개선안은 총 두 가지의 모델을 제안하였다. 첫 번째 개선된 모델은 프레임에 변화를 주지 않고 차량을 덮는 카울의 형상 변화를 주어 설계하였으며 두 번째 개선된 모델은 드라이버의 자세에 따른 프레임의 구조를 변경하여 차량 전체적인 형상의 변화를 주어 설계하였다.

### 2.1. 기존 모델 분석



Figure 2. 2023-KSAE E-Mobility 대회 차량

2023 KSAE E-Mobility 대회에 참가했던 기존 차량은 공기역학적 측면을 고려하지 않고 디자인한 모델이다. 해당 모델은 전면 투영 면적이 넓고, 전방 카울이 뚫려 있는 구조로 인해 내부 유동이 발생하며, 전면부의 각진 디자인으로 인해 전체적으로 높은 항력을 받는 구조이다. 또한 기존 모델의 후방 카울이 전자 제어 회로 및 장치가 있는 차량 후면에 효과적으로 공기의 흐름을 만들어 냉각 성능이 충분한지에 대해 CFD 해석으로 검증하였다.

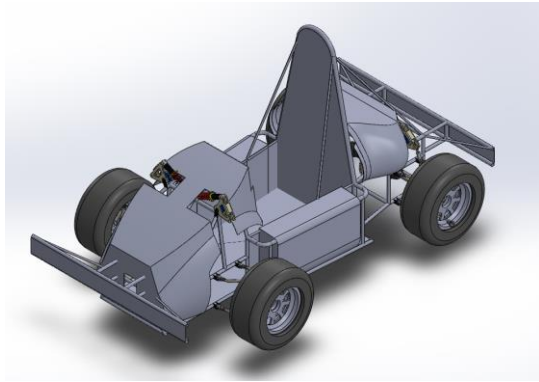


Figure 3. 실측 3D 모델

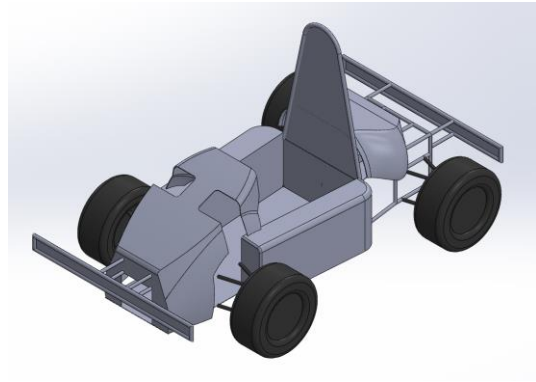


Figure 4. 해석용 3D 모델

CFD 해석에 앞서 기존 차량 제작에 사용된 실측 3D 모델의 Re-Modeling 하였다. 본 CFD 해석의 목적은 차량의 형상에 따른 항력을 비교하기 위함으로 내부 유동 분석보다 외부 유동 분석에 초점을 두었다. 따라서 Re-Modeling 한 3D 모델에서는 차량의 내부 부품들을 제거하고 Mesh 생성 및 해석에 방해가 될 수 있는 복잡한 형상들은 제거하였다. 그리고 프레임 제작에 사용된 중공 파이프는 중실축으로 변경하여 무의미한 Enclosure 가 생성되는 것을 방지하였다. 또한 Assemble 단계에서 면과 선이 접촉하거나 면과 점이 접촉하는 등 현실에서 물리적으로 불가능한 접촉 조건을 수정하여 Enclosure 생성 단계에서 오류가 생기지 않도록 수정하였다. 추가로 카울의 과한 필렛 형상은 Meshing Quality 를 저하시킬 수 있으므로 해석 결과에 큰 영향을 주지 않는 정도로 변경하여 Re-Modeling 하였다.

## 2.2. 모델 설계

### 2.2.1. 개선 모델 1

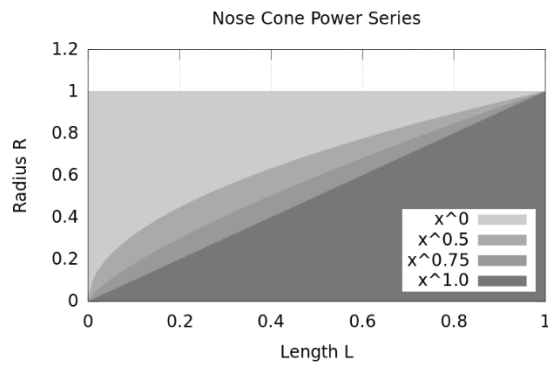


Figure 5. Power 0.5 Series

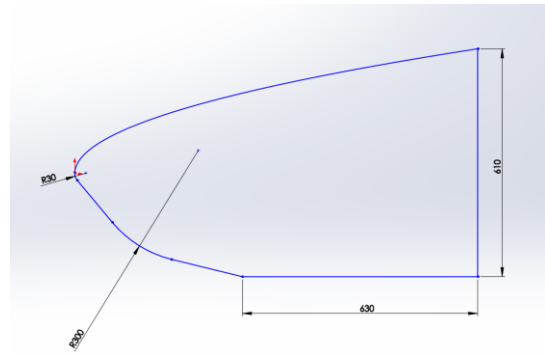


Figure 6. 개선 모델 1의 전방 카울 스케치

해당 모델은 차량의 프레임은 유지하고 프레임을 덮는 전면 카울과 후면 카울에만 변화를 주어 설계하였다. 기존 전방 카울의 문제였던 각진 디자인을 보완하고자 “Rocketry Nose Cone Design” 에서 아래 식인 Power 0.5 공식을 착안하여 설계하였다. 또한 전면 투영 면적의 큰 부분을 차지하고 있었던 전후방의 범퍼 철판과 RRH의 철판을 KSAE 규정 내에서 일부 제거하였다.

$$y = R \left( \frac{x}{L} \right)^n \{0 \leq n \leq 1\}$$

기존 모델의 경우 차량 후방의 빈 공간에 의해 와류 생성되어 항력이 증가되었다. 이를 개선하고자 경사가 있는 형태의 후방 카울을 설계하여 와류가 생성되는 공간을 최소화 하였다. 추가로 후방 카울의 양쪽 측면에 원통의 air vent 를 추가하여 후면부의 전자 장치에 직접적으로 공기의 흐름이 향하도록 하여 공냉 성능 향상을 도모하였다.

### 2.2.2. 개선 모델 2

두 번째 개선된 모델은 프레임 구조의 변화를 통해 보다 공기역학적인 측면을 고려하여 설계하였다. 이를 위해 신장 170cm 의 드라이버 운전 자세를 앉는 자세에서 30 도 가량 비스듬히 눕는 자세로 설계하여 차량의 전고를 낮춰 전방 투영 면적을 감소시켰으며 차량의 전체적인 형상을 유선형의 NACA Airfoil 을 토대로 디자인하여 항력 계수를 낮추고자 하였다. 차량의 RRH (Rear Roll Hoop)는 전복 상태에서 드라이버를 지키기 위해 필요한 장치이다. 2024-KSAE 규정에 따르면 RRH 에서 최전방 프레임까지 이은 선이 드라이버의 머리로부터 100mm 이상 거리를 유지해야 한다. 이를 고려하여 전방 투영 면적을 줄이기 위해 드라이버가 30 도 눕는 자세를 취했을 때 전방 시야가 확보되고 운전 불편함을 느끼지 않는 선에서 기존 차량보다 350mm 낮출 수 있었다.

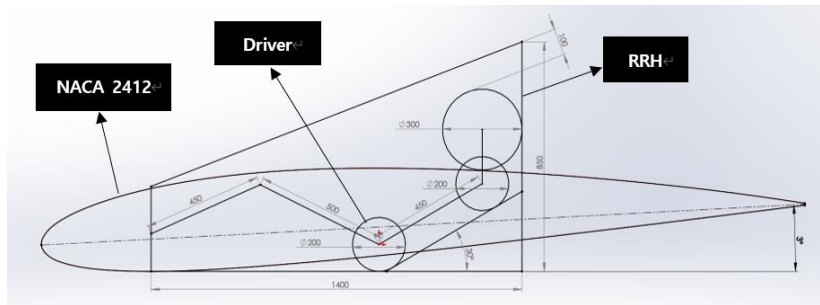


Figure 7. 개선 모델 2의 스케치

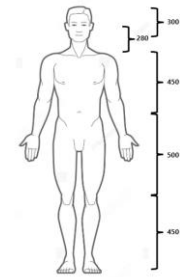


Figure 8. 드라이버 신장

차량의 전체적인 디자인을 위해 사용된 Airfoil 은 세 가지의 Airfoil 모델로 NACA 4412, NACA 2412, NACA 6409 이다. 해당 Airfoil 모델들은 낮은 항력의 특징을 갖는 모델들로 항공기 뿐만 아니라 상용 차량의 전면부, 루프라인, 스포일러 및 윙 등 다양한 부품에서 설계 원칙으로 쓰이고 있다. 따라서 세 가지의 Airfoil 의 받음각(AOA)이 변화함에 따라 양향비와 항력 계수를 비교하여 차량 디자인에 쓰일 최적의 Airfoil 모델과 받음각을 찾았다. 이 때 사용한 CFD 소프트웨어는 XFOIL 로, 이 소프트웨어는 포텐셜 흐름 해석 방법과 2D 의 간소화된 물리 모델을 사용함으로써 계산 속도가 빠르다는 장점이 있다. 아래 표는 XFOIL 로 구한 받음각에 따른 양향비와 항력 계수를 보여주며 그림은 Airfoil 모델 별 받음각에 따른 압력 분포를 벡터 형태로 보여준다.

Table 1. Lift-to-Drag Ratio and Drag Coefficient of NACA Airfoil at Different Angles of Attack

$\alpha^\circ$	NACA 4412		NACA 2412		NACA 6409	
	$\frac{C_L}{C_D}$	$C_D$	$\frac{C_L}{C_D}$	$C_D$	$\frac{C_L}{C_D}$	$C_D$
0	69.63	0.00682	42.5	0.00560	99.15	0.00704
-1	52.57	0.00697	21.58	0.00604	83.95	0.00701
-2	35.56	0.00712	3.27	0.00648	66.85	0.00714
-3	19.25	0.00737	-12.80	0.00694	48.86	0.00749
-4	3.87	0.00777	-26.42	0.00751	30.35	0.00836
-5	-9.82	0.00830	-37.48	0.00820	14.68	0.00964
-6	-21.17	0.00910	-46.07	0.00901	2.64	0.01125
-7	-30.24	0.01001	-52.17	0.01001	-	-

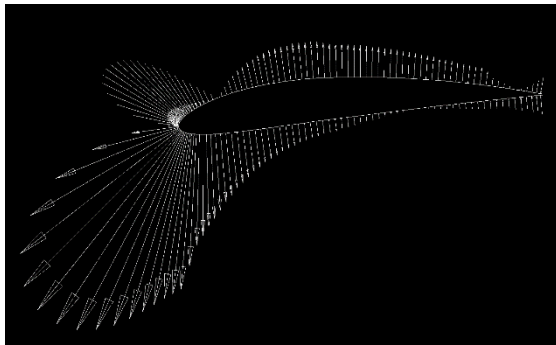


Figure 9. NACA 4412 ( $\alpha = -6^\circ$ )(XFOIL)

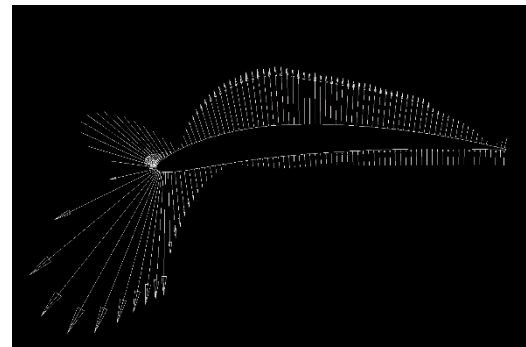


Figure 10. NACA 6409 ( $\alpha = -3^\circ$ )(XFOIL)

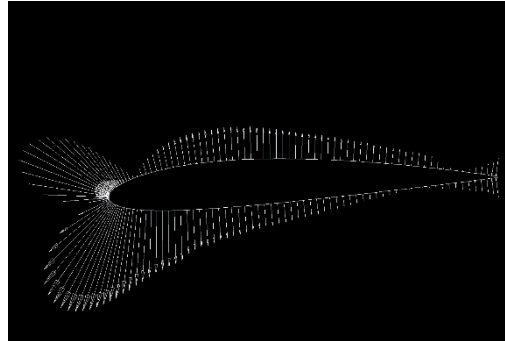


Figure 11. NACA 2412 ( $\alpha = -3^\circ$ )(XFOIL)

받음각을  $0^\circ \sim 7^\circ$ 까지 변화하였을 때 양항비가 음수의 값을 가지며 항력 계수가 가장 낮은 모델은 NACA 2412 ( $\alpha = -3^\circ$ )이다. 양력 계수가 큰 음수의 값을 가질수록 주행에서 다운 포스가 증가하며 접지력이 향상되어 모터의 동력 전달과 코너링에서 안정성을 높일 수 있다. 그러나 차량의 무게로 인한 다운 포스(-2452.5N)와 비교하였을 때 형상에 따른 다운 포스는 유의미한 변화를 가져다 주지 않으므로 낮은 항력 계수에 초점을 두어 해당 Air foil 모델로 결정하였다.

개선 모델 2 후방 카울의 Air vent 는 원통형에서 타원형으로 설계하여 유체가 좁은 통로로 지나갈 수 있도록 설계 하였다.

### 2.3. 모델 비교

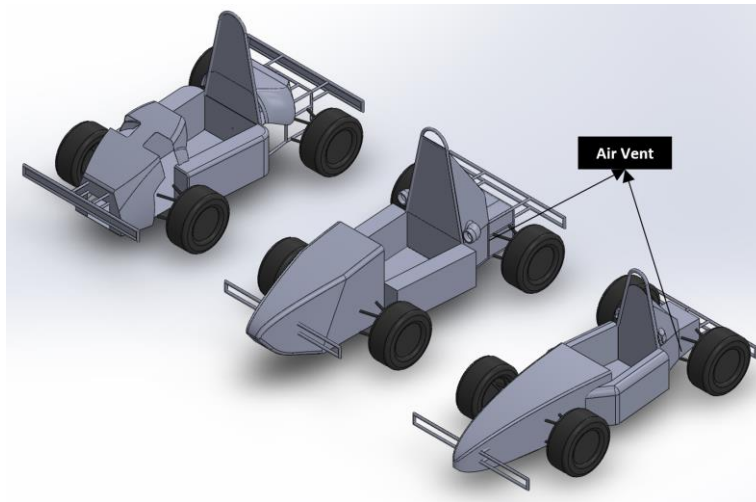


Figure 12. Old(left), Advanced 1(Middle), Advanced 2(Right) (Diagonal View)

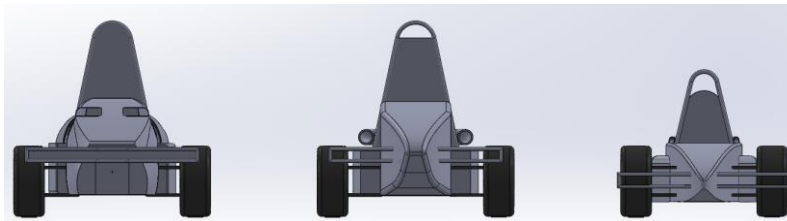


Figure 13. Old(left), Advanced 1(Middle), Advanced 2(Right) (Front View)

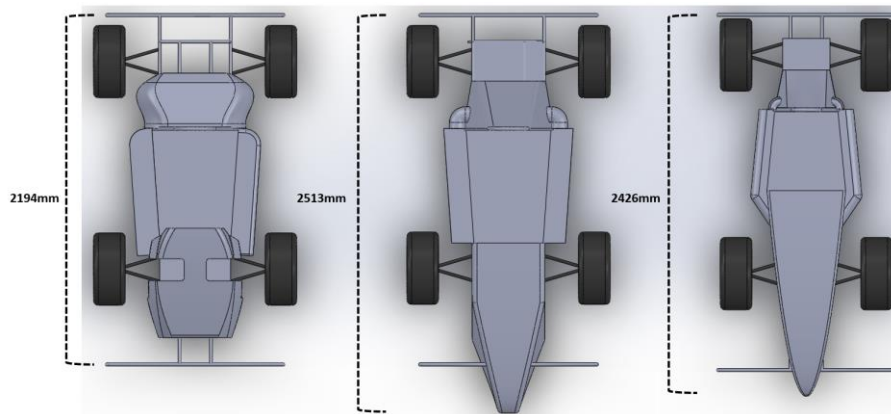


Figure 14. Old(left), Advanced 1(Middle), Advanced 2(Right) (Top View)

Table 2. Projected Area of Models

	Original	Advanced 1	Advanced 2
$A(m^2)$	0.40	0.385	0.3

앞선 개선안을 통해 설계한 모델들은 위 사진과 같다. 기존 모델의 각진 디자인을 보완하여 전체적으로 유선형 디자인으로 설계하였으며, Table 2.에서 확인할 수 있듯이 전면 투영 면적이 많이 감소되었음을 알 수 있다.



# III. CFD Simulation

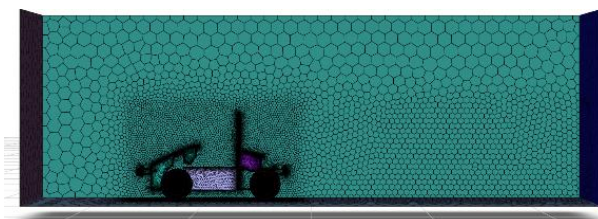
## 3.1. 매쉬 조건

CFD 해석에서 적절한 Mesh 조건 설정은 해석에서 높은 정확도를 보여준다. 차량의 각 영역의 특징에 따라 적절한 타입과 크기로 Surface Mesh, Volume Mesh, Boundary Layer(경계층) 조건을 설정하였다.

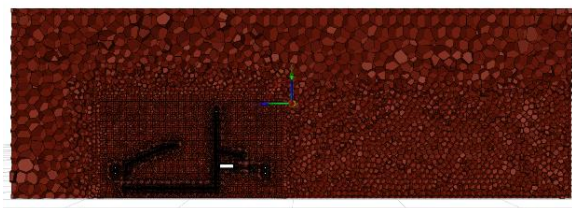
**Table 3. Mesh Conditions**

Region	Type	Size (mm)
BOI-nearfield	Body of Influence	40
BOI-farfield	Body of Influence	90
Bumper and Rods	Curvature	Min:4 / Max:5
Cowl	Curvature	Min:5 / Max:30
Wheel	Curvature	Min:3.5 / Max: 5
Boundary Layer	Last-ratio	10 layers / Ratio: 0.2
Surface	Curvature & Proximity	Min: 0.5 / Max: 256
Volume	Poly-hexcore	Min: 0.5 / Max: 512

BOI(Boundary of Interest)는 차량 주변 유체의 흐름을 정확하게 해석하기 위해 설정하는 구역으로, BOI-nearfield 는 40mm, BOI-farfield 는 90mm 로 설정하였다. 또한 파이프나 카울과 같이 복잡한 곡면 형상의 정확한 유체 흐름 해석을 가능하게 하기 위해 Curvature type 으로 설정하였다.



**Figure 15. Surface Mesh**



**Figure 16. Volume Mesh**

아래의 그래프는 Mesh 의 Quality 를 알아보기 위한 Skewness, Orthogonal 특성을 나타낸다. 먼저 Skewness 특성은 셀이 이상적인 형상(정육면체) 에서 얼마나 왜곡되었는지를 나타낸다. Skewness 값이 0 에 가까울수록 이상적인 형상에 가깝고, 1 에



가까울수록 심하게 왜곡되어 Mesh Quality 가 낮음을 나타낸다. 주로 3D 모델이 날카로운 모서리를 가지거나 필렛이 과한 복잡한 형태를 가질 경우 낮은 Skewness 값을 가진다.

Orthogonal 특성은 셀의 모서리 각이 얼마나 직각에 가까운지를 나타낸다. Orthogonal 값이 1 에 가까울수록 Mesh Quality 가 높고 0 에 가까울수록 Mesh Quality 를 가진다. 아래의 도표는 각각 셀들의 Skewness 값과 Orthogonal 값을 나타낸다.

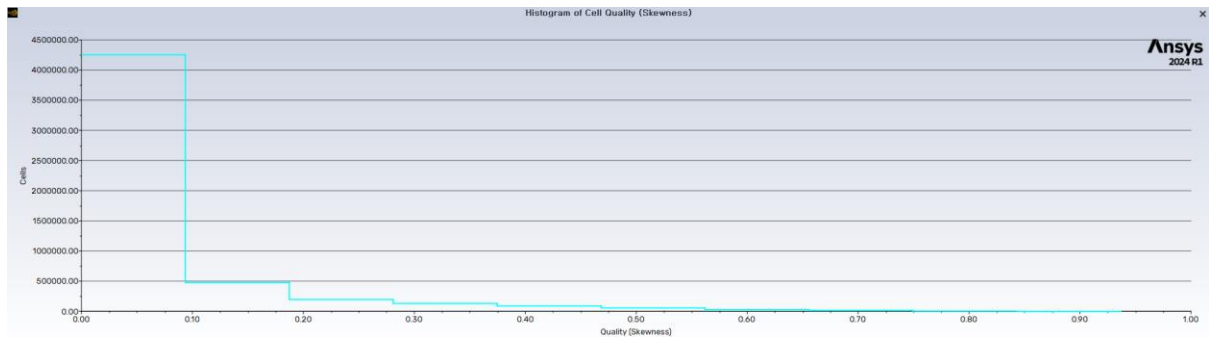


Figure 17. Skewness Quality

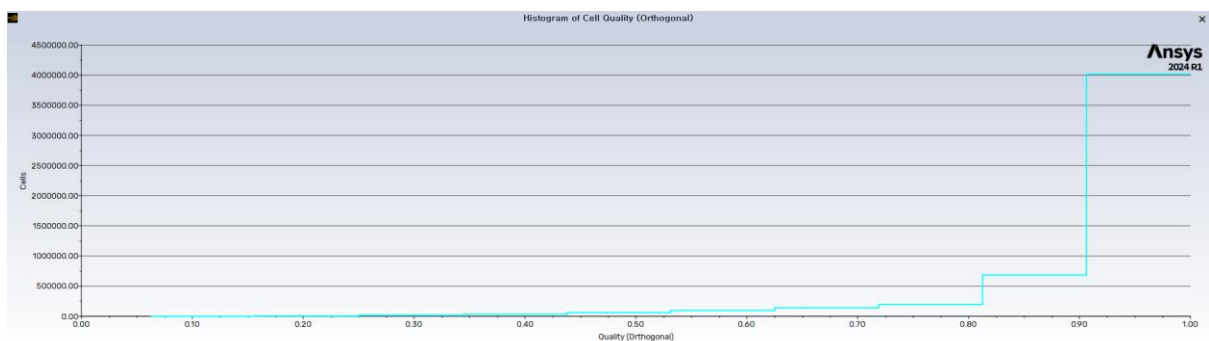


Figure 18. Orthogonal Quality

작은 Mesh Size 는 기하급수적으로 큰 계산 비용을 초래할 수 있다. 따라서 적절한 Mesh Size 를 찾기 위해 Mesh Convergence 과정을 거쳤다. 이는 다양한 Mesh 크기를 적용하여 동일한 조건으로 해석을 반복하였을 때 Mesh Convergence 가 되었는지 확인하는 것으로 5% 미만의 차이를 보인다면 적절한 Mesh Size 라는 것을 의미한다. 아래 도표에서 볼 수 있듯이 Mesh 크기를 크게 했을 때와 위 표의 조건으로 진행했을 때 해석 결과에서 1.3%의 차이를 보였다. 이는 위 표의 크기 조건이 적절하다는 것을 나타낸다. 이 때 총 Cell 수는 2,580,000 개 이다.

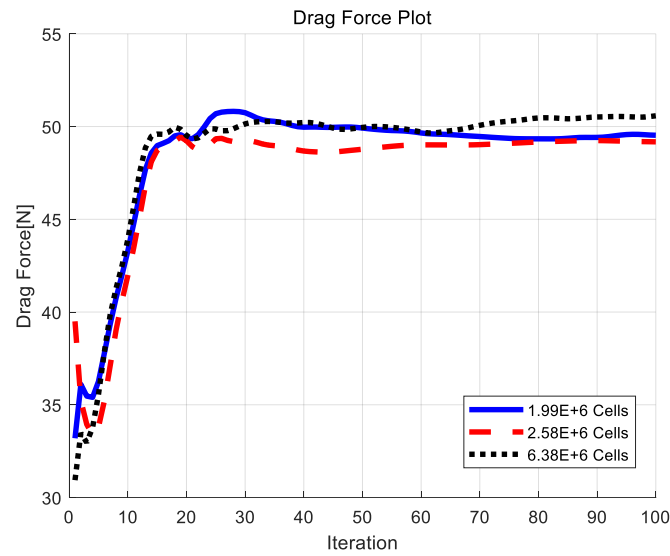


Figure 19. Mesh Convergence

### 3.2. 경계 조건과 난류 모델

Table 4. Boundary Conditions used in CFD Simulation

Type	Condition	Speed
Inlet	Velocity-Inlet	20 [m/s]
Outlet	Pressure-Outlet	-
Cowl	Stationary-Wall	-
Frame	Stationary-Wall	-
Wheel	Rotational	87.489 [rad/s]
Ground	Translational	-20 [m/s]
Tunnel-Wall	No Shear	-
Symmetry	Symmetry Condition	-

해석 조건으로 설정한 Boundary Condition 은 Table 4.와 같다. 이는 차량이 2023-KSAE 대회에서의 최고 속도인 72km/h 로 등속직선운동 했을 때를 가정하여 설정하였으며 이 때 바퀴는 회전 운동을, 터널 벽면은 전단 응력이 발생하지 않도록 설정하였다.

해석에 사용된 난류 모델은 Spalart-Allmaras 로 SST  $k - \omega$  모델과 비교하였을 때 두 개의 수송 방정식을 사용하는 대신 단일 수송 방정식을 사용하여 점성 계수를 구하기 때문에 계산 비용이 낮고 경계층 유동, 외부 유동을 예측하는데 특화되어 있다. 이는 차량의 형태에 따른 항력 계산에 유리한 모델이며 낮은 계산 비용에 비해 연구 목적에 맞는 높은 정확도를 보여준다.

## IV. 풍동 실험

### 4.1. 실험 목표

풍동의 팬이 25Hz, 30Hz, 35Hz 로 회전할 때의 풍속과, 이 때의 기존 모델, 개선 모델 1, 개선 모델 2 의 항력을 측정한다. 이후 시뮬레이션 결과와 비교한다.

### 4.2. 실험 설계 및 방법

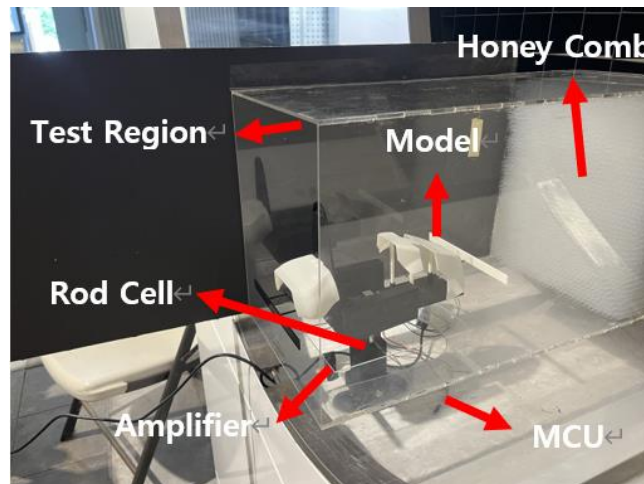
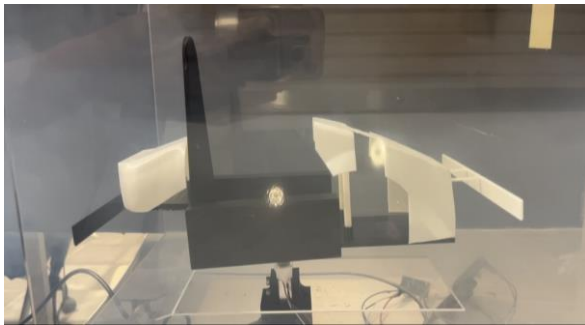


Figure 20. Wind Tunnel Experiment Setting

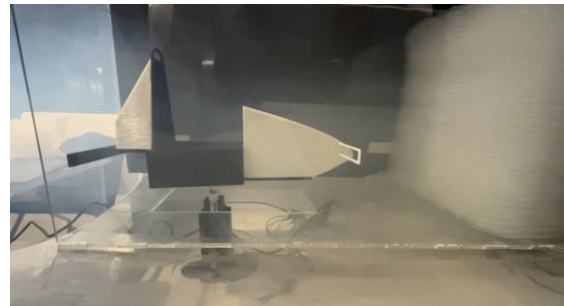
풍동 실험에 사용된 부품과 센서의 상세한 내용은 Table 5.와 같다. 풍동 실험 과정에서 풍동의 크기에 비해 실험하고자 하는 모델의 크기는 3D 프린터의 한계로 작아 실험 구역을 따로 설정해주어야 했다. 실험 구역을 제한하기 위해 아크릴 판을 가공하여 정해진 구역 내에서 같은 풍속의 바람이 나올 수 있도록 하였다. Honey Comb 는 풍동의 팬으로부터 나온 난류의 바람을 층류로 바꿔주는 역할을 한다. Honey Comb 는 250mm 의 투명 빨대를 절반으로 잘라 Inlet 에 빈틈없이 설치하여 제작하였다. 측정부는 Figure 20.에서 볼 수 있듯이 Connector, 로드셀, Amplifier, MCU 로 이루어진다. Connector 는 Rod Cell 과 풍동 사이를 고정하는 부품으로 바람으로 인한 Drag Force 가 X 축 방향으로만 가해질 수 있도록 한다. Inlet 으로 들어온 바람이 실험 모델에 압력을 가하면 로드셀의 스트레인게이지에 변형이 생기면서 저항에 변화가 생긴다. 이 후 HX-711 로 증폭된 신호가 MCU 에서 처리된다.

**Table 5. Experiment Equipment's Specification**

Object	Specification	Manufacturer
Wind Tunnel	풍동 터빈 파워 실험장치	WindLab
Wind Gauge	DT-8880	CEM
Fog Machine	Z-800III	Antari
Test Region	Acrylic board	HGU-MCE
Connector	3D print	HGU-MCE
Rod Cell	4 선식 로드셀 무게센서 5kg	-
Amplifier	24 비트 A/D 컨버터 HX-711	-
MCU	Arduino Uno	Arduino
Honey Comb	Transparent Straw – 250mm	-



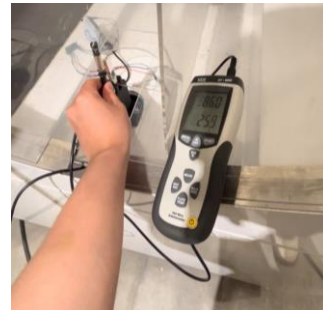
**Figure 21. Old Model**



**Figure 22. Advanced 1 Model**



**Figure 23. Advanced 2 Model**



**Figure 24. Wind Gauge**

## V. 결과

### 5.1. 시뮬레이션 결과

#### 5.1.1. Drag Performance

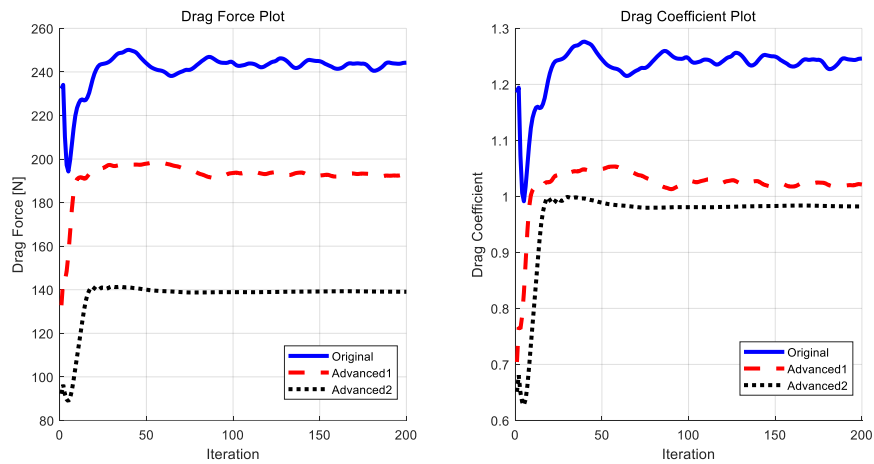
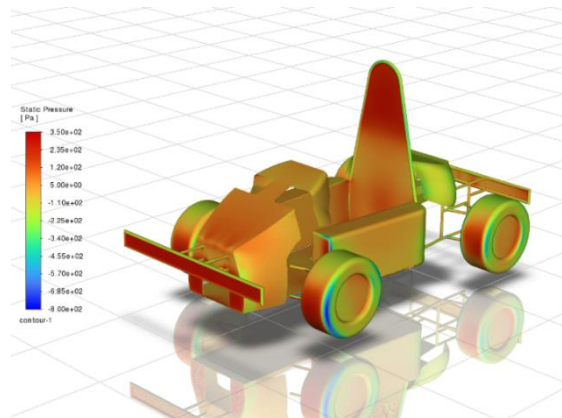
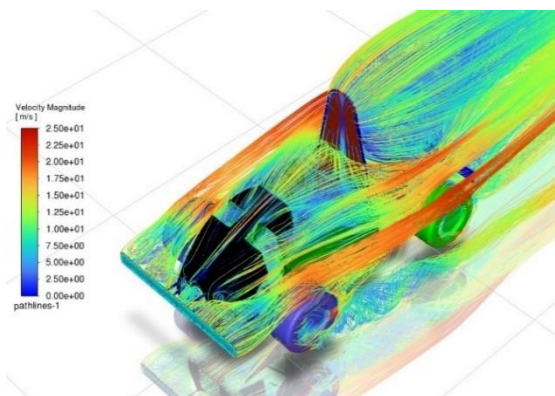


Figure 25. Drag Force & Coefficient Plot

CFD 해석 결과는 앞선 해석 조건을 적용하였을 때 Drag force 는 기존 모델이 245[N] , 개선 모델 1 은 195[N], 개선 모델 2 는 140[N]의 결과가 나왔다. Drag Coefficient 는 기존 모델이 1.24, 개선 모델 1 이 1.03, 개선 모델 2 는 0.98 의 결과가 나왔다. 개선 모델 1, 개선 모델 2 는 기존 모델보다 각각 20.4%, 43% 항력 감소를 이뤘으며 항력 계수는 기존 모델에 비해 17%, 21% 개선되었다.





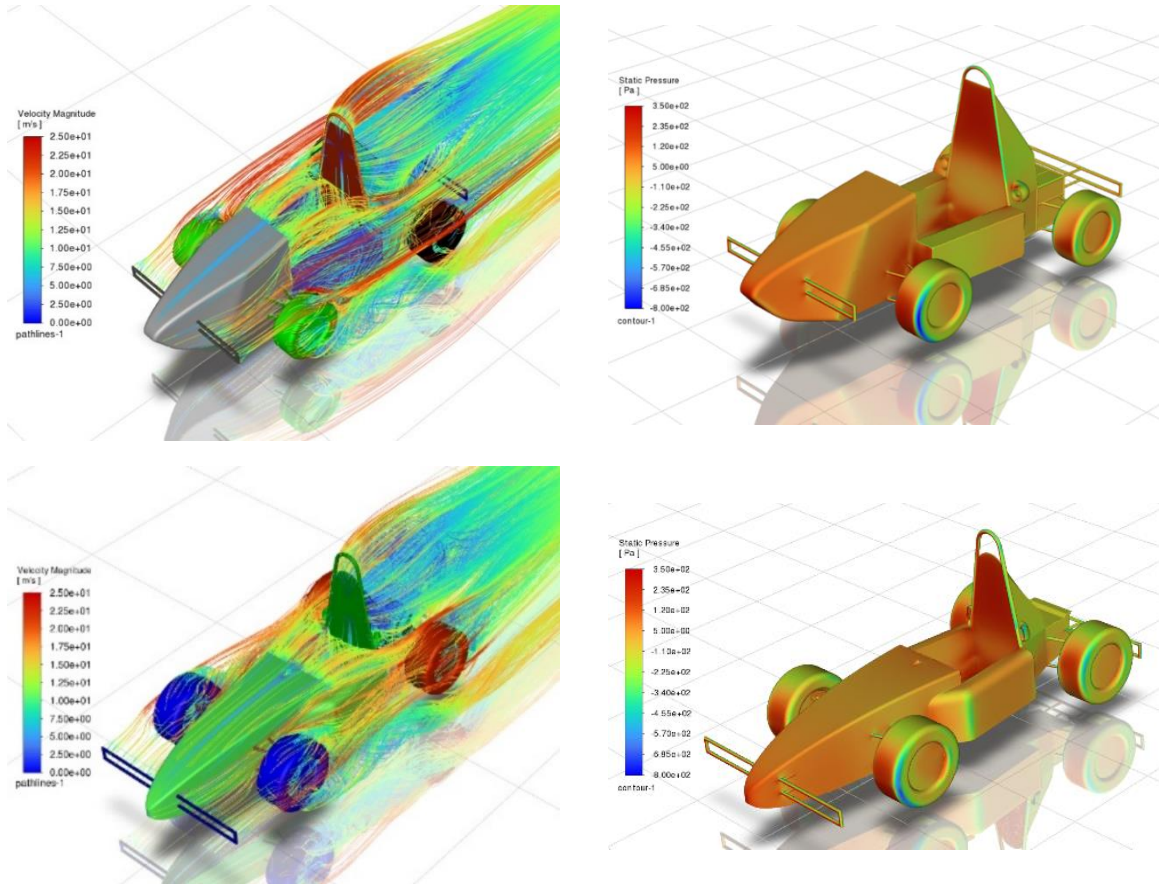


Figure 26. Velocity pathlines and Pressure Contour of Models(Old, Advanced 1, Advanced 2)

### 5.1.2. Cooling Performance

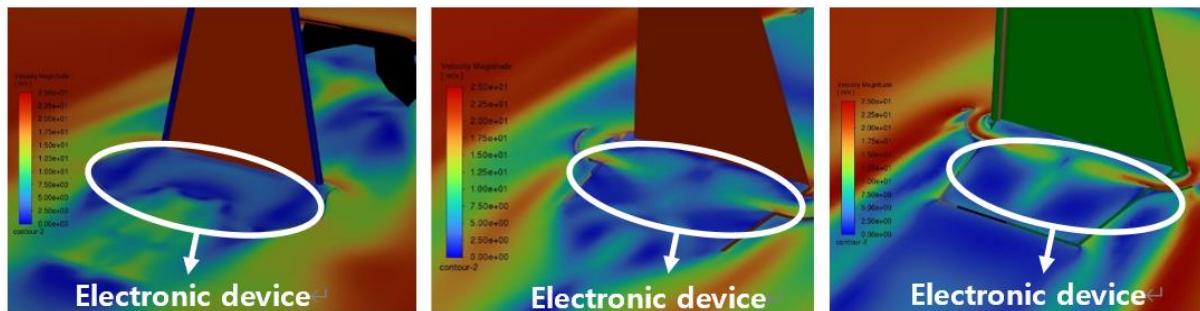


Figure 27. Rear Cowl Velocity Contour (Original, Advanced 1, Advanced 2)

Cooling 성능을 비교하였을 때 차량 후방의 전자 장치가 위치한 곳에 흐르는 유체의 속도는 Figure 27.에서 볼 수 있듯이 각각 기존 모델이 2.5m/s, 개선 모델 1 은 10m/s, 개선 모델 2 는 16m/s 인 것을 확인할 수 있다.

## 5.2. 풍동 실험 결과

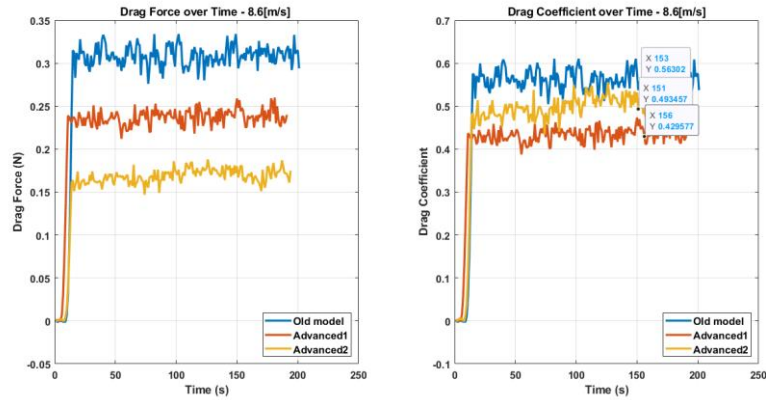


Figure 28. Drag Force & Coefficient of Three Models (8.6[m/s])

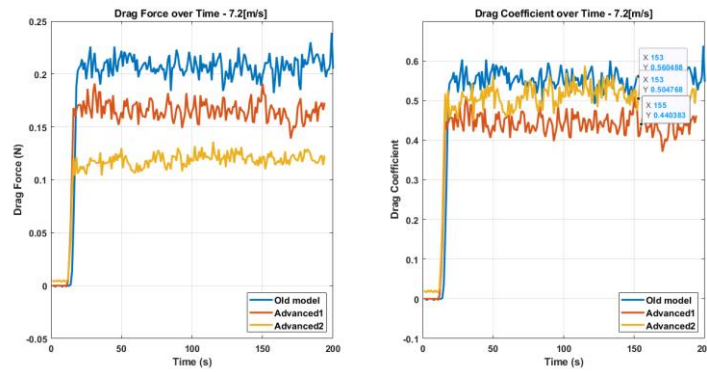


Figure 29. Drag Force & Coefficient of Three Models (7.2[m/s])

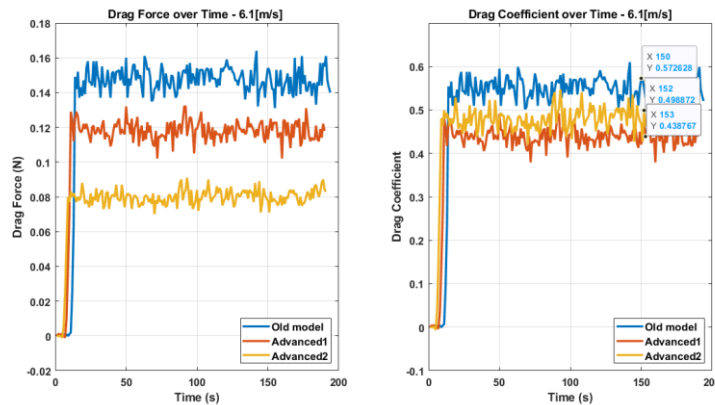
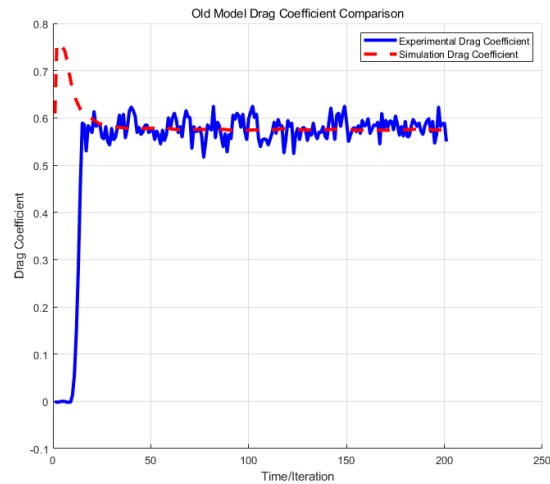


Figure 30. Drag Force & Coefficient of Three Models (6.1[m/s])

풍동의 팬이 35[Hz], 30[Hz], 25[Hz] 회전할 때의 풍속은 각각 8.6[m/s], 7.2[m/s], 6.1[m/s]이다. 그리고 3D 프린트로 출력한 기존 모델, 개선 모델 1,2 의 각 전면 투영 면적은 Ansys Space Claim 에서 측정한 결과  $0.0118[m^2]$ ,  $0.0118[m^2]$ ,  $0.0073[m^2]$  란 것을 알 수 있었다. 공기 밀도는 표준 공기 밀도인  $1.225[kg/m^3]$ 으로 설정하였다. 해당 수치들과

실험으로 얻은 Drag Force 로 각 모델들의 Drag Coefficient 를 구하여 도시하였다 (Figure 28, 29, 30.). 실험과 시뮬레이션의 해석 오차를 계산하기 위해 앞선 시뮬레이션과 동일한 조건을 적용하여 실험에 사용한 모델을 해석하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 도출한 각각의 Drag Coefficient 는 Figure 31.과 같다.



**Figure 31. Comparison of Drag Coefficient (Simulation and Experiment)**



## VI. 논의

Table 6. DIY Car Spec Sheet

<b>Power [KW]</b>	8.6
<b>Torque [Nm]</b>	33.9
<b><math>\omega</math> [rad/s]</b>	254.59
<b>Wheel Radius [m]</b>	0.115
<b><math>Z_A:Z_B</math></b>	17:50
<b><math>m</math> [kg]</b>	250
<b><math>f_l</math>: friction loss</b>	0.7
<b><math>c_l</math>: circuit loss</b>	0.85

기존의 각진 모양의 차량에 비해 유선형으로 설계한 개선 모델 1, 2 는 항력 계수에서 17%, 21%의 개선을 보였으며 작은 전방 투영 면적으로 인해 낮은 항력을 가질 수 있었다. 개선된 항력을 Table 6.의 KSAE 대회에 출전하는 차량의 정보로 구한 추진력과 비교하였다. 아래의 식으로 차량의 추진력을 구할 수 있다.

$$F_{thrust} = \frac{T}{R} \times \frac{Z_B}{Z_A} \times f_l \times c_l = 515.87[N]$$

이를 통해 감소된 항력인 105[N]이 차량의 주행 성능에서 큰 부분을 차지하고 있다는 것을 알 수 있다.

CFD 해석 조건의 신뢰성을 더하기 위해 풍동 실험 결과값과 시뮬레이션 결과값을 비교하였다. 비록 측정 센서(로드셀)의 한계와 풍속의 일정하지 않아 실험값에 외란이 포함되어 있지만 Figure 31.에서 볼 수 있듯이 실험 결과값과 시뮬레이션 결과값이 큰 차이를 보이지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 CFD 해석 조건이 올바르게 구성되었음을 나타낸다. 또한 Figure 28, 29, 30.에서 볼 수 있듯이 Inlet 으로 들어오는 풍속이 변화함에도 불구하고 각 모델들이 일정한 Drag Coefficient 를 가지는 것을 통해 실험 설계가 올바르게 되었음을 알 수 있다.

## VII. 결론

지난 대회와 차량은 각진 형상과 넓은 투영 면적으로 인해 72[km/h]의 속도에서 245[N]의 항력을 가진다. 개선된 모델은 유선형 형상으로 설계하고 넓은 면적을 차지한 부분을 보완하여 기존보다 105[N]의 항력 개선을 이룰 수 있었다. 감소된 항력은 차량의 최고 속도 및 최고 속도 도달 시간을 단축시킬 수 있고 항력은 차량 속도의 제곱에 비례하므로 전면 투영 면적을 줄이고 항력 계수를 낮출수록 주행 성능에서의 이점은 극대화 될 것이다. 대회 규정 중 RRH 로 인해 전면 투영 면적과 항력 계수를 낮추는 것에 한계가 있었지만 지속적인 연구가 계속된다면 더 나은 성능을 기대할 수 있을 것이라 생각된다.

전자 장치 냉각 성능을 위한 Air vent 를 설치한 결과, 유체가 Air vent 의 좁은 통로를 지나면서 기존 차량보다 13.5[m/s] 빠르고 낮은 온도의 유체 흐름으로 인해 공냉으로 인한 전자 장치의 냉각 성능이 개선되었음을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] Prakhar Mahobia. (2017). “Computational Fluid Dynamics Based Design and Investigation of Nose Cone Aerodynamics of Formula Style Student Designed Racecar” , Department of Applied Mechanics Indian Institute of Technology, Delhi Haus Khas, Delhi, India.
- [2] Maria Eduarda Marques, Gabriela Oliveira, Guilherme Canuto da Silva (2021). “Ergonomics study for chassis construction of a SAE Formula Prototype” , Universidade Federal do ABC, Santo André, Brazil.
- [3] Md Arafur Hoque, Md Saifur Rahman, Khairun Nasrin Rimi (2023), “Enhancing formula student car performance: Nose shape optimization via adjoint method” Department of Mechanical and Production Engineering, Ahsanullah University of Science and Technology, Dhaka, 1208, Bangladesh.
- [4] Arnav Pandit, Gwyn Harold George Day (2021), “An Analysis and Survey on the Aerodynamics of F1 Car Design” The Shri Ram School Aravali, Gurugram, Haryana, India.

# Appendix

```
#include <HX711.h>
#define DOUT 3
#define CLK 2
HX711 scale(DOUT, CLK);

float calibration_factor = -208000; // 초기 보정 계수

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 Calibration");

  scale.set_scale(); // 초기화: 보정 계수 없이 설정
  scale.tare(); // 초기 무게를 0으로 설정
  long zero_factor = scale.read_average(); // 현재 무게 기준점 저장
  Serial.print("Zero factor: "); // 초기 기준점 출력
  Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {
  scale.set_scale(calibration_factor); // 보정 계수 설정
  float weightInLbs = scale.get_units(); // 현재 무게를 파운드 단위로 읽기
  float weightInN = weightInLbs * 4.44822; // 파운드를 뉴턴으로 변환

  Serial.print("Drag Force(N): ");
  Serial.println(weightInN, 3); // 뉴턴 단위로 변환된 값 출력

  delay(1000); // 1초 대기

  // 시리얼 모니터를 통해 보정 계수를 조정
  if (Serial.available()) {
    char temp = Serial.read();
    if(temp == 'p') {
      calibration_factor += 1000; // '+' 키를 눌러 보정 계수 증가
      Serial.print("Calibration factor increased to: ");
      Serial.println(calibration_factor);
    }
    else if(temp == 'o') {
      calibration_factor -= 1000; // '-' 키를 눌러 보정 계수 감소
      Serial.print("Calibration factor decreased to: ");
      Serial.println(calibration_factor);
    }
    else if(temp == 's') {
      Serial.print("Calibration factor: ");
      Serial.println(calibration_factor); // 현재 보정 계수 출력
    }
    else if(temp == 'i') {
      scale.tare(); // 'i' 키를 눌러 초기화
      Serial.println("Scale reset to 0 N");
    }
  }
}
```

Figure 32. 풍동 실험 아두이노-로드셀 코드

# 자작 전기차의 CFD 해석을 통한 항력 감소와 냉각 성능 개선

안건힐\*, 이종선\*

## Drag Force Reduction and Cooling Performance Improvement through CFD Analysis of Self-made Electric Vehicle

G. H. An, C. S. Lee\*

한동대학교 기계제어공학부<sup>1</sup>

**Key Words:** Drag Force Reduction, Cooling Performance, CFD, Self-made Electric Vehicle

### 1. 서론

본 논문에서는 KSAE(대학생 자작 전기차 대회) 출전용 전기 자동차의 CFD(Computational Fluid Dynamics) 해석을 통해 차량의 항력 감소와 전자 회로의 냉각 효과 증진을 목적으로 한다. 기존 차량의 카울은 높은 항력을 받는 구조이며 전자 회로의 효과적인 냉각이 이루어지지 않는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Ansys Fluent를 활용하여 항력을 최소화하고 전자 회로의 냉각을 개선한 모델을 제시하고 풍동 실험을 통해 해석 조건의 신뢰성을 더하고자 한다.

### 2. 설계 방법

#### 2.1 모델링



Fig.1 Old, Advanced-1.2 (SolidWorks)

Fig.1에서 두 개선된 모델에서는 입사면에서의 투영 면적을 최소화하기 위해 범퍼와 RRH (Rear Roll Hoop) 철판을 제거하였다. 개선 모델1은 Rocketry Nose Cone 공식의 Power 0.5 식을 착안하였으며 개선 모델 2는 Air foil 중 NACA 2412 (받음각  $-3^\circ$ )를 토대로 설계하였다. 차량 후방은 기존 Air Duct의 구조를 변화하여 직접적으로 전자 회로를 공냉으로 냉각할 수 있도록 설계를 개선하였다.

#### 2.2 해석 방법 및 조건

난류 모델은 계산 비용이 낮고 경계층 주변에서의 해석에 장점이 있는 Spalart-Allmaras 모델을 사용하였다. 해석을 위한 입출력 및 경계조건은 Table 1과 같이 설정하였다.

Table. 1 Boundary Conditions used in CFD Simulation

Type	Condition	Speed
Inlet	Velocity-Inlet	16.67 [m/s]
Outlet	Pressure-Outlet	-
Cowl	Stationary-Wall	-
Frame	Stationary-Wall	-
Wheel	Rotational	72.48 [rad/s]

안건힐\*, 이종선\*(clee@handong.edu)

Ground Tunnel-Wall	Translational No Shear	-16.67 [m/s]
-----------------------	---------------------------	--------------

### 2.3 해석 결과

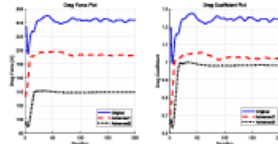


Fig. 2 Comparison of Drag Forces Between Three Models

기존 모델의 경우 245[N], 개선모델1, 2의 경우 각각 195[N], 140[N]의 결과가 도출되었다. Fig.3에서 볼 수 있듯이 기존모델의 경우 전자회로에 흐르는 유체의 속도는 기존 모델 2.5[m/s], 개선모델 1,2는 각각 10[m/s], 16[m/s]이다.

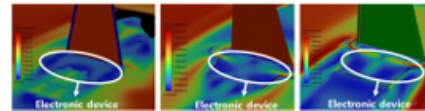


Fig.3 Fluid Velocity over Electronic Circuits (Ansys Fluent)

### 2.4 실험 결과

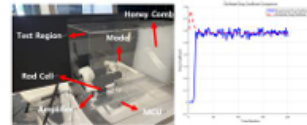


Fig.4 Test Settings & Comparison of Test and Simulation Results

Fig 4. 와 같이 풍동 실험을 진행한 결과, CFD 해석 결과와 큰 차이가 보이지 않았다. 이로써 CFD 해석 조건이 올바르게 설정되었음을 확인할 수 있었다.

### 3. 결론

개선된 두개의 모델에서 항력은 각각 20.4%, 43% 감소하였고 개선모델2에서 Air Duct를 추가함으로써 냉각 기능이 향상되었다.

### 참고문헌

- (1) Prakhar Mahobia. (2017). Computational Fluid Dynamics Based Design and Investigation of Nose Cone Aerodynamics of Formula Style Student Designed Racecar