

## 2D 차체 모델을 이용한 공력성능 최적화

정 종 현 · 민 승 재\*

한양대학교 미래자동차공학과

### Optimizing Aerodynamic Performance Using 2D Vehicle Model

Jonghyun Jung · Seungjae Min\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

**Abstract** : Due to reinforced vehicle emission regulations and rising fuel price, the need to increase the fuel efficiency is ever rising in the field of automotive industry. CFD softwares and hardwares have significantly developed, that it is now able to compute complicated flow around vehicle body.

This paper uses 2D vehicle model for computation and optimization. The model is set that 2D vehicle model is in the wind tunnel, and k- $\epsilon$  model is used to compute the model. Based on the computation result, fixed constraints and variables for optimization are chosen. Optimization is done by using COBYLA optimization method and parametric sweep. Finally, the numeric result between the original model and optimized model is compared, and analysis is done to inspect the reason for the improvement.

**Key words** : Aerodynamic drag(공기저항), Automotive aerodynamics(자동차 공기역학), Computational fluid dynamics(전산유체역학), Drag reduction(항력 저감), Optimization(최적화), Simplified model(단순화모델)

#### Nomenclature

L : vehicle length, m  
H : vehicle height, m  
Cl : vehicle clearance, m  
V : vehicle speed, m/s  
 $\rho$  : air density, kg/m<sup>3</sup>  
A : projectile area

#### Subscripts

d : drag  
R : roof  
H : hood  
FO : front overhang  
RO : rear overhang  
T : tail

#### 1. 서론

강화된 연비 규제 및 유가 상승 등으로 인하여 자동차 산업에서 연비 개선에 대한 중요성이 증대되고 있다. 한편, 전산유체역학(CFD) 분야에서는 유체 해석 소프트웨어 및 컴퓨터 하드웨어가 크게 발전하여, 고속 주행 시의 차체 주변의 복잡한 유동에 대해서도 비교적 정확한 해석이 가능해졌다.

그러나 아직까지는 3D 차체를 이용하여 해석을 진행하기에는 고 성능의 하드웨어가 요구되며 해석 시간 또한 매우 오래 걸린다. 이에, 본 논문에서는 현재 시중에서 판매되고 있는 실제 차량의 옆면을 2D로 단순화 한 모델을 바탕으로, 공력 성능 해석 및 최적화를 수행한다. 이를 위해 CATIA를 이용하여 2D 차량 모델링, 상용 해석 소프트웨어인 COMSOL을 이용하여 차량이 풍동 내에 있는 상황을 구현한다. 해석 결과 공력 성능을 저해하는 요소를 설계 변수로 설정하여 최적화를 진행한다. 마지막으로, 초기 모델과 최적화를 수행한

\* Corresponding author, E-mail: seungjae@hanyang.ac.kr

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

모델 간의 공력 성능 결과를 비교하고 분석을 수행한다.

## 2. 공력성능 해석 모델

자동차가 주행 시 항력계수에 영향을 주는 부분은 크게 차체, 바퀴, 측면거울 셋으로 나눌 수 있다. 이 중 차체가 항력계수에 주는 영향은 52.6%로 반을 넘는다.<sup>1)</sup> 차체에 의한 항력을 최소화하기 위해, 차 중심 면을 기준으로 2D로 모델링한 모델을 이용하였다.

### 2.1 해석 모델 제작

#### 2.1.1 난류 모델 선정

차량 공력성능의 해석에 있어서 k-ε 모델을 이용하였다. k-ε 모델의 특징은 다음과 같다.<sup>2)</sup>

1) 난류 운동 에너지 k, 에너지 소실 ε 두 변수에 대해 난류를 해석하며, 그 수식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

2) 수렴성이 좋고, 높은 메모리 용량을 요구하지 않는다.

3) Wall function을 이용하여 벽 주변의 점성 유동에 대해서도 해석이 가능.

4) 복잡한 기하 형상에 대해서도 해석 가능.

5) 차체의 공력성능을 해석하는 타 논문에서도 많이 이용됨.<sup>1,3)</sup>

#### 2.1.2 차량 및 풍동 모델링

해석에 이용될 차량 모델로 현대자동차에서 출시된 2018 SONATA를 선정하였다. CATIA의 Sketch Tracer 기능을 이용하여, 실제 차량의 치수를 기반으로 2D 모델링을 진행하였다. 모델 차량의 전장은 L=4855mm, 높이는 H=1410mm, 지면에서 차체 바닥까지의 거리는 Cl=190mm이다.

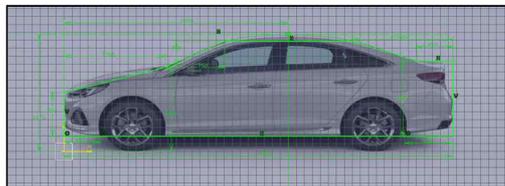


Fig. 1 Modeling of 2D car using CATIA's sketch tracer tool

차량이 풍동 내에 있는 상황을 COMSOL을 이용하여 구현하였으며 주요 치수는 다음과 같다.

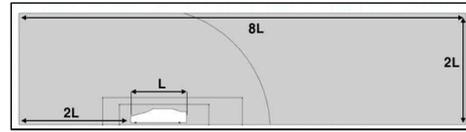


Fig. 2 Modeling of wind tunnel and major parameters

#### 2.1.3 해석 조건 설정

차량이 시속 100km/h로 달리는 조건을 구현하기 위해 inlet으로부터 27.78m/s의 velocity inflow를, outflow는 대기압과 같도록 설정하였다. 차량의 주행은 비압축성 유동으로 단순화가 가능하므로, 공기의 밀도 ρ를 상수 값인 1.2044kg/m³로 설정하였다. 풍동 내 주행을 구현하기 위해 차체와 바닥에는 점성효과가 발생하도록 wall function, 천장은 점성효과가 발생하지 않도록 slip 조건을 각각 적용하였다.

$$F_d = \int (P_x + \rho u_x^2 \frac{u_x}{|u|}) dx \quad (3)$$

차체에 작용하는 항력 계산을 위해 다음 식을 차체에 대해 차량 주행 방향인 x 방향으로 적분하였다. 이때 앞의 항은 압력에 의한 항력이며 뒤의 항은 점성에 의한 항력이다.

#### 2.1.4 격자 구성

차체로부터의 거리 및 유동의 복잡함에 따라 차별적으로 격자를 구성하기 위해, fig. 2에 표현된 영역마다 요소의 크기를 다르게 하였다. 차량 표면의 격자 크기는 최대 1mm이며, 점성 효과가 발생하는 차체 및 바닥에는 8개의 층으로 이루어진 boundary layer를 적용하였다. 생성된 총 격자의 개수는 637,885개이며, 생성된 격자의 모습은 다음과 같다.

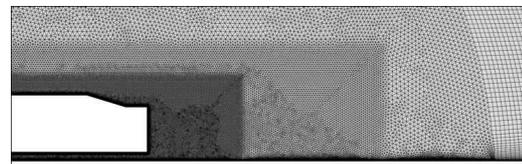


Fig. 3 Mesh around a vehicle

## 2.2 해석 실행 및 매개변수 설정

### 2.2.1 해석 결과 분석

2.1절에서 제작한 모델의 해석을 실행한 결과, 4h 34min 28s의 시간이 소요되었다. (CPU : Intel Core i5-4590, RAM : 16GB) 차체에 작용하는 항력은 F<sub>d</sub>=219.59N/m로 계산되었다.

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

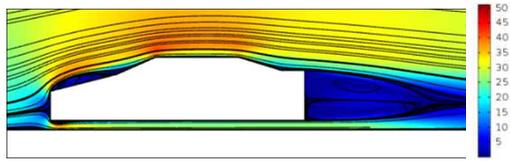


Fig. 4 Resulting velocity and streamline around a vehicle

해석 결과 차체 주변의 공기의 속도 및 유선은 위와 같으며, 다음과 같은 특성을 보인다.

- 1) 엔진룸 앞에서의 급격한 유동 방향 변화로 인해 후드 및 앞 오버행에서 와류가 발생함.
- 2) 트렁크 및 뒤 오버행에서 공기가 지면과 수평하게 분리되어 공기가 빠르게 수렴하지 않고, 이로 인해 트렁크 뒤 wake가 크게 나옴.
- 3) 지붕 위 유선이 유선형이지 않음.

### 2.2.2 구속 조건 및 설계변수 선정

차량의 기존 엔진룸, 실내 공간, 트렁크의 크기를 유지하도록 구속 조건을 설정하였다. 앞서 수행한 해석 결과를 바탕으로, 공기역학적으로 취약한 부분을 최적화를 위한 설계변수로 선정하였다.

- 1) 엔진룸 앞의 급격한 유동 변화를 해결하기 위해 후드의 형상 및 곡률과 앞 오버행의 기울기.
- 2) 트렁크 뒤 공기의 수렴성을 향상시키기 위한 뒤 트렁크 꼬리의 형상과 뒤 오버행의 기울기.
- 3) 지붕 위의 유동을 유선형으로 만들기 위한 지붕의 곡률.

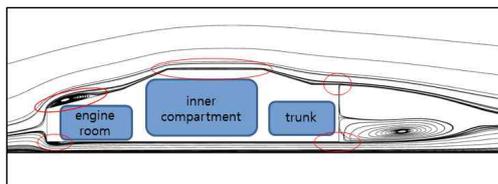


Fig. 5 Constraints and design variables for optimization

### 2.2.3 설계변수의 형상 및 범위 결정

- 1) 지붕은 sine 파형으로 위로 볼록 튀어나오도록 형상을 설정했으며, 차량의 기존 차고 H에 비해 너무 크게 바뀌지 않도록 Var\_R의 범위를 설정했다.
- 2) 앞 오버행은 차량의 nose부터 앞바퀴가 시작되는 지점인 450mm 길이를 Var\_FO의 기울기로 변화하도록 설정했다. Var\_FO 값의 변화로 인해 엔진룸의 공간이 줄어들지 않도록 Var\_FO의 범위를 설정했다.
- 3) 뒤 오버행은 트렁크 끝부터 뒷바퀴가 시작되는 지점인 600mm 길이를 Var\_RO의 기울기로

변하도록 설정했다. Var\_RO 값의 변화로 인해 트렁크의 공간이 줄어들지 않도록 Var\_RO의 범위를 설정했다.

4) 처음에는 후드의 최적 형상으로 sine 파형을 제안했었다. 그러나 sine 파형을 이용할 경우, 진폭이 커짐에 따라 운전자의 시야를 가리는 현상이 발생한다. 이에 Simulink를 이용하여 후드 앞이 곡선이면서 운전자의 시야를 방해하지 않도록 매개변수 식 및 변수의 범위를 설정했다.

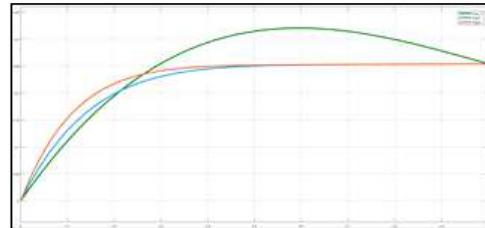


Fig. 6 Choosing shape of hood using Simulink

5) 트렁크 뒤 tail에 대한 형상 최적화를 위해, 트렁크 뒷면 상부 20%에 해당하는 190mm 길이에 대해서 매개변수를 설정한다. 형상은 뿔 모양으로 하되, 트렁크 윗면과 나란히 지면과 수평하게 시작하여, 트렁크 뒷면과 나란히 지면에 수직으로 끝나는 형상을 선택하고자 했다. 트렁크 뒤 tail의 형상에 대해서도 후드와 같은 방법으로 Simulink를 이용하여 기본 형상을 결정하였으며, 뿔이 과도하게 튀어나오지 않도록 뿔의 크기에 대한 변수 Var\_T를 설정했다.

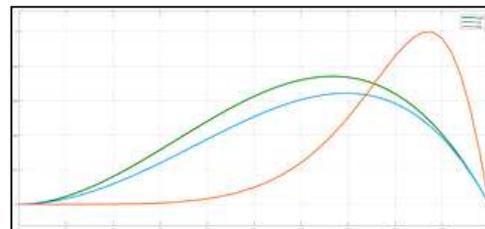


Fig. 7 Choosing shape of trunk tail using Simulink

이 절에서 언급된 각 설계 변수에 대한 매개변수 식 및 변수의 범위를 정리한 결과는 다음 표와 같다.

\*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

Table 1 Parametric curve equations and range for selected design variables

Part	Parametric equation	Range
Roof	$Var\_R * \sin(\pi * s)$	$Var\_R : 0 \sim 0.3$
Front Overhang	$s * \tan(Var\_FO^\circ)$	$Var\_FO : 0 \sim 25$
Rear Overhang	$s * \tan(Var\_RO^\circ)$	$Var\_RO : 0 \sim 10$
Hood	$Var\_H * (-s^9 + s)$	$Var\_H : 0 \sim 0.4$
Trunk Tail	$Var\_T * \sin(\pi * s^3)$	$Var\_T : 0 \sim 1$

where  $s$  : Value on each part between 0 and 1

### 3. 공력성능 최적화

#### 3.1 최적화 실행

앞서 수행한 공력성능 분석 결과 및 설계변수 설정에 대하여 최적화를 실행한다.

##### 3.1.1 최적화 진행을 위한 해석 모델

2장에서 공력성능을 위해 제작한 모델을 이용하여 최적화를 진행하기에는 시간이 너무 많이 소요되므로, 기존 모델에 비해 격자를 1/10 조밀하게 구성한 모델을 제작하여 해석을 수행하였다.

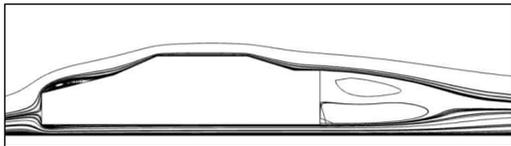


Fig. 8 Computation result of coarse mesh model

조밀한 모델의 격자의 개수는 45,688개이며, 해석 소요 시간은 6min 46s이다. 조밀한 격자 모델의 타당성을 검증하기 위해 기존 정밀한 모델과의 유선형을 비교했다. 기존의 정밀한 격자에 대한 유선형인 Fig. 4와 조밀한 격자에 대한 유선형인 Fig. 8은 같은 경향을 띄므로, 조밀한 모델을 이용한 최적화 수행은 타당하다.

##### 3.1.2 지붕, 후드, 오버행에 대한 최적화

지붕, 후드, 앞, 뒤 오버행에 대한 최적화에는, 처음 생성된 격자를 지정된 매개변수에 따라 변형을 하는 deformed geometry tool을 이용했다. 차체에 작용하는 항력의 최소화를 목적함수로, COBYLA solver를 이용하여 최적화를 진행했다. 최적화를 위해 선택한 COBYLA solver는 설계 변수가 10개 이하인 경우에 연산이 다른 solver 대비 빠르다는 장점이 있다.<sup>4)</sup>

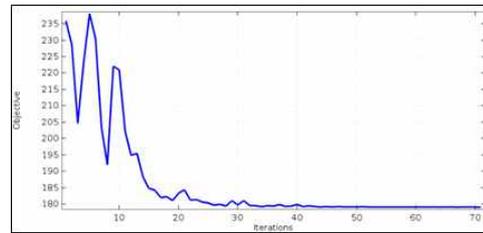


Fig. 9 Optimization result using COBYLA solver

허용 오차를 0.01%로 설정한 후 optimization을 수행한 결과, 71회의 iteration이 이뤄졌으며 34h 7min 34s의 연산 시간이 소요되었다. 연산 결과  $Var\_R$ 은 0.186,  $Var\_FO$ 는 25.0,  $Var\_RO$ 는 2.3,  $Var\_H$ 는 0.19인 지점에서 항력이 최소화 되었다.

##### 3.1.3 트렁크 뒤 tail에 대한 최적화

트렁크 뒤 tail도 deformed geometry tool을 적용시켜 다른 변수들과 동시에 최적화를 수행하려 했으나, tail 주변 격자의 변형이 너무 커서 실행할 수 없었다. 그러므로 tail을 제외한 나머지 설계변수에 대해 최적화를 진행한 모델을 바탕으로, tail에 대해서만 최적화를 따로 진행하였다. 이때 tail 부근 유동에 대해서는 정밀한 해석이 요구되므로, tail 부근에는 더 정밀한 격자를 구성한 후 최적화를 진행하였다.

Tail의 최적화에는 변수  $Var\_T$ 의 변화에 따라 격자를 새로 생성하며 해석을 수행하는 parametric sweep을 이용하였으며, 변수를 0.05 단위로 변화시키며 연산을 수행했다.

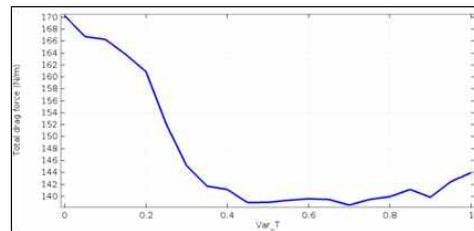


Fig. 10 Optimization of trunk tail using parametric sweep

연산은 2h 28min 18s의 시간이 소요되었으며 항력은  $Var\_T$ 가 0.7인 지점에서 최소가 된다.

##### 3.1.4 최적화 결과를 적용한 공력성능 해석

앞선 절에서 나온 최적화 된 변수를 적용하여 정밀한 격자를 구성한 후 해석을 수행했다. 격자 수준은 기존 차량의 공력성능 해석에 적용한 수준과 같으며, 생성된 격자의 수는 663,586개, 연산 소요 시간은 2h 46min 43s 이다.

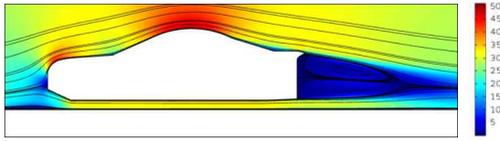


Fig. 11 Computation result of optimized fine mesh model

해석 결과 항력은  $F_d=120.76\text{N/m}$ 로, 이는 기존 모델의 결과인  $F_d=219.59\text{N/m}$ 에 비해 45% 감소한 수치이다.

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho AV^2} \quad (4)$$

항력과 항력계수의 관계 공식을 이용하여 항력 계수를 계산한 결과, 기존 모델  $C_d=0.3938$ 에서 최적화 모델은  $C_d=0.1876$ 으로 항력계수 또한 52.4% 감소하였다. 항력과 항력계수의 변화율이 다른 이유는 지붕의 굴곡 값이 달라짐에 따라 차량의 높이 H와 투영 면적 A가 달라졌기 때문이다.

### 3.2 최적화 결과 분석

#### 3.2.1 지붕의 영향 분석

차량 지붕의 camber 값 변화에 대한 영향을 보기 위해 다른 변수들은 적용하지 않고 지붕에 대한 변수 Var\_R 값만 변화시키며 항력 및 항력성능의 변화를 보았다. Parametric sweep를 이용하여 Var\_R 값을 0에서 0.3 사이의 20개의 값에 대하여 계산한 결과 항력계수  $C_d$ 는 Var\_R = 0.2842인 지점에서 최솟값이 나오지만, 항력  $F_d$ 는 Var\_R = 0.1737인 지점에서 최솟값이 된다. 이를 통해, 지붕의 camber 값은 어느 정도까지는 커질수록 항력 계수가 작아지지만, 너무 커지면 차량의 앞면 투영 면적 A가 증가하여 항력이 오히려 증가함을 알 수 있다.<sup>5)</sup>

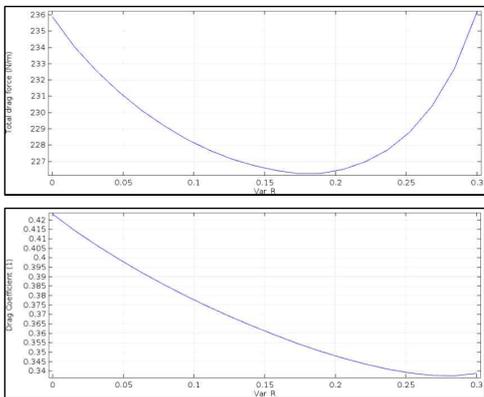


Fig. 12 Effect of roof camber on drag force (upper) and drag coefficient (lower) of a vehicle

#### 3.2.2 후드 및 앞 오버행의 영향 분석

최적화 전의 모델에서는 차량의 엔진룸 앞에서 유동이 급격하게 변하여 후드와 앞 오버행 부근에 진공 현상이 있었다. 후드를 굴곡이 있는 현상으로 변경한 결과, 후드 주변의 유동이 부드러워졌으며 진공 현상도 사라졌다.

앞 후드는 기울기를 기존 0도에서 25° 로 변경함에 따라 차체 밑으로 들어가는 유동이 부드러워졌으며 진공이 사라졌다. 또한, 앞 후드의 기울기가 설계 변수의 상한 값과 일치한다는 점을 미뤄봤을 때, 앞 후드의 기울기가 더 크면 항력이 더 작아질 수도 있다는 것을 추론할 수 있다.

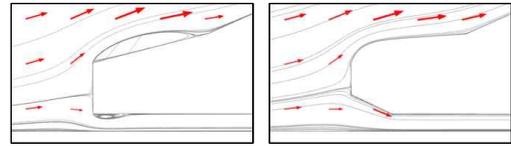


Fig. 13 Flow around front of a vehicle before (left) and after (right) the optimization

#### 3.2.3 뒤 오버행의 영향 분석

최적화 후의 오버행 기울기는 2.3° 로, 이는 다른 변수들에 비해 값의 변화가 작은 편이다. 디퓨저의 발산 각도가 작으면 난류가 발생하지 않고 트렁크 뒤쪽으로 공기가 수렴하지만, 발산 각도가 커질수록 Fig. 14와 같이 난류가 발생하여 오히려 항력이 증가하는 요소가 됨을 알 수 있다.<sup>6)</sup>

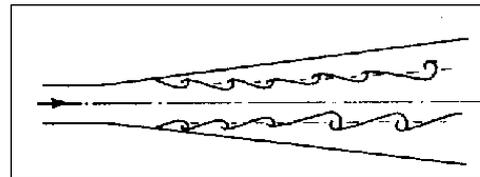


Fig. 14 Flow separation of a diffuser

#### 3.2.4 트렁크 뒤 tail의 영향 분석

트렁크 뒤 tail 또한 트렁크 뒤로의 공기의 수렴성을 개선시키는 요인이 된다. Fig. 15를 통해 tail을 적용함으로써 트렁크 뒤 진공 현상이 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 개선률을 수치적으로 확인하기 위해 tail 적용 전, 후의 트렁크 뒷면에 작용하는 항력을 계산해봤다. 그 결과, tail 적용 전에는 127.77N/m, 적용 후에는 99.79N/m로, 트렁크 뒤 항력은 21.9% 개선되었다.

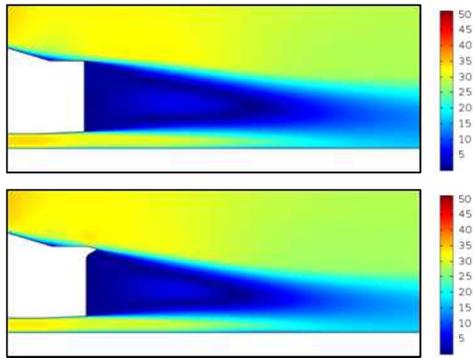


Fig. 15 Availability of a tail and effect on flow behind a trunk

#### 4. 결론

본 연구에서는 2D로 단순화 한 차량 모델에 대해서  $k-\epsilon$  모델을 이용하여 공력성능 해석을 수행하였다. 공력 성능의 개선이 필요한 부분을 설계 변수로 선정하여 매개변수로 지정, 최적화를 진행하였다. 최적화를 통해 항력 및 항력계수를 각각 45%, 52.4% 개선하였으며, 그 이유를 분석하였다.

#### 후 기

종합설계 진행 초기에는 주제조차 제대로 정하지 못하고 많이 방향을 했습니다. 그럴 때마다 교수님과 조교님의 진심어린 조언 및 도움을 받아가며 방향을 잡을 수 있었고 무사히 논문 작성을 마칠 수 있었습니다. 이 자리를 통해 감사의 말씀을 드립니다.

이번 연구를 통해서, 학부에서 배운 유체역학, CAE 등 다양한 교과목을 적용하여 전산유체역학(CFD)에 대한 최적화를 진행 해보았습니다. 이미 많은 연구가 이뤄진 분야였지만, 직접 논문들을 참고하고, 모델을 제작하고 최적화 프로세스를 구상하여 효율적인 최적화를 진행하는 등, 현업에서 수행하는 CFD 해석 및 최적화 절차를 몸소 체험할 수 있는 의미 있는 시간이었습니다.

#### References

1) K. S. Song, S. O. Kang, H. I. Park, J. D. Kee, K. H. Kim and D. H. LEE, "Study on the Influence of Wheel Arches, Wheels, and Side Mirrors on Aerodynamic Performance of a Fast Cruising Passenger Car," Transactions of KSAE, Vol.20, No.5,

pp.26-35, 2012.

2) S. Wasserman, Choosing the Right Turbulence Model for Your CFD Simulation, <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743>, 2016.

3) J. Y. Park, Vortex Control Device Development for Drag Reduction of a Passenger Car Using CFD, MS Dissertation, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 2017.

4) W. Frei, "Optimization with COMSOL Multiphysics," COMSOL Tokyo Conference 2014, 2014.

5) I. Y. Song, Y. J. Song, Y. J. Kim, "A Study on the Aerodynamic Characteristics for Active Rear Diffuser of Ahmed Body," KSME Fall Conference Proceedings, pp.534-538, 2015.

6) Raja, Vehicle Body Engineering, <http://itsmyblogvbe.blogspot.com/2015/07/car-aerodynamics.html>, 2015.