

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.1.501

JCCT 2020-2-63

자동차 차체 형태 디자인이 공기역학 성능에 미치는 영향에 대한 연구

Research on the Effect of Car Body Design on CFD Aerodynamics Performance

김정민

Kim Jeong Min

요약 본 실험 연구에서는 대표적인 네 가지 타입의 승용차 차량형태에 대한 공기역학(공력) 성능 분석, 측면 유리의 각도에 따른 공력 성능 분석, 엔진후드(엔진 덮개)의 각도차이에 따른 공력 성능 분석, 루프 라인의 각도 차이에 따른 공력 성능 분석을 통해 차량의 형태 변화에 따라 공력 성능이 어떻게 변화하는지를 종합적으로 분석해 보았다. 실험 결과 비스듬히 떨어지는 후면 유리 라인은 공력 성능을 저하시켰고, 루프의 각도 차이에 따른 공력 성능 차이는 거의 나타나지 않았으며 일찍 떨어지는 후면 라인은 공력 성능에 가시적인 영향을 끼치지 않았다. 차량의 루프라인이 수평으로 늦게까지 이어지다 천천히 떨어지는 후면 유리 라인은 스타일링에 도움이 될지언정 공력 성능은 저하시켰다. 후방 디퓨저의 경우 차체의 형태에 따라 그 성능 효과가 달라지는 것으로 판단되었다.

주요어 : 다학제 연구, 공기역학, 자동차 디자인, CFD, 디자인 가이드라인

Abstract In this experimental study, we have analyzed aerodynamic performance of the four representative types of passenger car vehicles, different types of side window angles, different types of engine hood angles, and the angle difference of the roof line in order to comprehensively analyze how the aerodynamic performance varies with different shape of vehicle. Experiment results showed that the rear window falling at a certain angle lowered aerodynamic performance, angle difference of the lowered roof line did not affect aerodynamic performance, and the back window line falling at certain angles had no visible effect on aerodynamic performance. Back window line leaning towards front side may help enhance styling aesthetics, but aerodynamic performance decreased. In case of rear diffuser installation, aerodynamic performance also decreased.

Key words : Multidisciplinary research, Aerodynamics, car design, CFD, Design guideline

1. 서론

심각해지는 지구 온난화와 환경오염 문제에 대응하기 위해 세계적으로 자동차 배기가스와 연료효율에 대

한 규제가 강화되고 있다 [1]. 자동차의 공기역학(공력) 성능은 운행 연비에 지대한 영향을 미친다. 일반적으로 10% 공력 성능 개선시의 연비 개선은 고속 주행(140 km/h) 조건일 때 7%에 달한다 [2]. 자동차 디자이너들

*정희원, 서울여자대학교 산업디자인학과 조교수
접수일: 2019년 11월 28일, 수정완료일: 2019년 12월 13일
게재확정일: 2019년 12월 23일

Received: November 28, 2019 / Revised: December 13, 2019
Accepted: December 23, 2019
*Corresponding Author: iceblau@gmail.com
Dept. of Industrial Design, Seoul Women's Univ., Korea

이 차량의 외형 디자인 작업시 ‘공기역학적인 형상’을 디자인 요소로 받아들여 차량 디자인에 반영하는 경향이 있는데 [2] 꽤 많은 경우 형태적으로만 공기역학적으로 우수해 보일 뿐 실질적으로는 공력 성능 개선까지 이어지지 않는 경우가 많이 있다. 자동차 디자인(스타일링) 작업의 모든 단계에서 디자인팀과 공력팀간 원활한 협력이 이루어진다면 이러한 문제를 해결 할 수 있겠지만 전면적 협력은 현실적으로 쉽지 않다. 따라서 디자이너들이 참고할 수 있는 디자인을 위한 공력 성능 가이드라인 같은 자료가 필요하다. Kim [3]은 디자이너들이 자동차 외형 디자인 작업을 할 때 도움을 받을 수 있도록 모서리 필렛, 차량의 전면부 각도차, 후면부 각도차, 디퓨저 적용 등 다양한 디자인 요소들의 적용이 자동차 공력 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였다. Kim [3]의 연구는 다양한 요소들의 조합이 서로 어떤 방식으로 작용하여 공력 성능에 영향을 미치는지 밝혀냈지만 실험에 사용된 차체들의 형태가 단순화되어 있었기에 실제 도로에서 사용되는 대표적인 차량 형태를 적용한 실험 연구의 필요성이 도출되었다. 이에 본 실험 연구에서는 대표적인 4가지 타입의 차량 형태에 대한 공력 분석, 측면 유리의 각도에 따른 공력 성능 분석, 엔진후드(엔진 덮개)의 각도차이에 따른 공력 성능 분석, 루프 라인의 각도 차이에 따른 공력 성능 분석을 통해 차량의 형태 변화에 따라 공력 성능이 어떻게 변화하는지 종합적으로 분석해 보았다.

II. 실험 설정

오토데스크사의 유체동역학 분석 Flow Design 소프트웨어를 사용해 공력 측정 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 시뮬레이션에 사용한 윈드터널내의 유동 속도는 28 m/s (100.8 km/h) 으로 설정하였고 윈드터널의 폭은 9.4미터, 길이는 21.3미터, 높이는 5.2미터로 설정하였다. 실험에 사용한 각 차체 모델별로 각각 시뮬레이션을 돌렸으며, Flow Design 소프트웨어 분석이 안정화(stabilized 표시) 된 이후 제시된 Cd 값으로 차체별 공력 성능을 비교하였다. Cd 값이 낮을수록 자동차의 주행과 반대 방향으로 발생하는 항력(drag force)이 낮음을 의미하며, 본 논문에서는 Cd 값이 낮을수록 공기역학 성능이 우수하다고 표현하였다. 추가적으로, 애니메이션으로 보여지는 유동(공기의 흐름) 시각화를 통해

각 차체별로 Cd 값이 높게, 또는 낮게 나오는 원인을 파악해 볼 수 있었다.

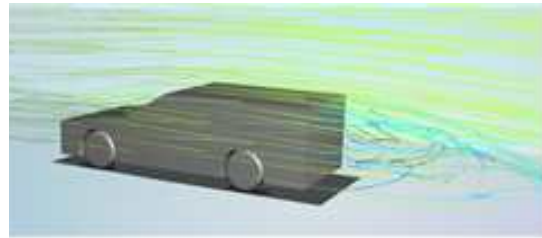


그림 1. 유동의 시각화 - 루프를 타고 넘어온 유동이 차량 후방에서 회오리처럼 순환하는 모습을 보여주는 후면부 재순환 영역 (파랑색 선으로 표시)

Figure 1. Visualization of air flow - backside circulation of the air flow

III. 실험 및 결과

1. 차체 측면 형태에 따른 공력 성능 비교

첫 번째 실험에서는 4가지 대표적 차체 형태(밴형, 왜건형, 해치백형 및 세단형)의 시뮬레이션 결과값을 Autodesk사의 CFD 툴을 사용하여 구했다. 실험에 사용된 컴퓨터 모델링 된 차체의 길이, 높이 및 폭은 모두 동일하였다. <그림 2>와 같이 차량의 길이는 4620mm, 높이는 1266mm, 그리고 <그림 2>에 표현되지 않은 차량의 폭은 1800mm로 설정하였다 이는 BMW사의 F80 M3 차량의 실제 치수를 바탕으로 설정하였다.

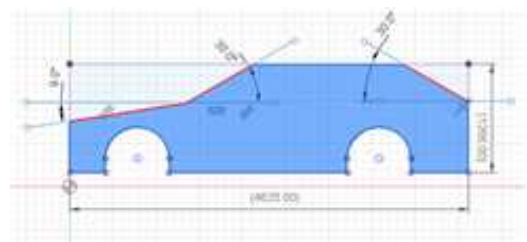


그림 2. 해치백 타입(C 타입) 차체의 치수 및 각도 정보
Figure 2. Dimension of Hatchback type model (Type C)

<그림 3>의 B, C, D 타입의 경우 엔진후드 및 앞 유리(윈드실드)의 각도, 엔진후드와 앞 유리가 만나는 지점의 위치는 실존하는 차량인 BMW사의 F80 M3 차량의 측면도를 바탕으로 설정하였다.

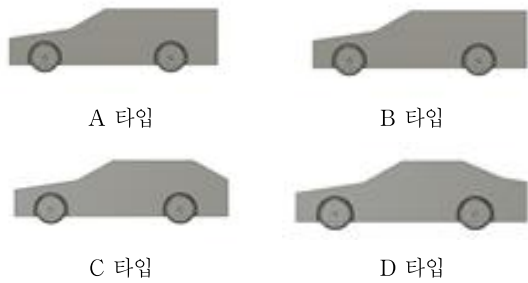


그림 3. 실험 1에 사용된 4가지 대표적 차체 형태(벤형, 왜건형, 해치백형 및 세단형)

Figure 3. Side views of the four types of tested models

도로에서 볼 수 있는 일반적 형태의 차량 타입인 해치백타입(C 타입)과 세단타입(D 타입)의 공기 역학 성능이 A 타입과 B 타입 보다 더 뛰어날 것으로 기대되었으나 시뮬레이션 결과는 예상과는 달랐다.

<그림 4>에서 보여지듯 엔진후드와 앞 유리가 일직선으로 이어지는 A타입이 가장 낮은 Cd 값을 보여주었고 우리나라에서는 보기 힘든 왜건 차량 형태에 가까운 B 타입이 두 번째로 낮은 Cd 값을 보여주었다. 가장 공력 성능이 좋은 A타입의 경우 성능이 가장 좋지 않았던 C 타입(해치백 타입) 보다 23% 높은 공력 성능을 보여주었다. 전방 유동이 앞 유리에 부딪히면서 1차적 손실이 발생하고, 루프가 일찍 끝나게 되어 보다 근거리에서 보다 강한 후면부 재순환(루프를 타고 넘어온 유동이 차량 후방에서 회오리처럼 순환하는 모습을 보여주는 영역)이 일어나 Cd 값이 커진 것으로 판단된다. 따라서, 공기역학 성능을 높이기 위해서는 엔진후드와 앞 유리의 각도차이를 최대한 줄이고 루프가 끝나는 지점은 최대한 뒤로 가져가는 것이 좋을 것으로 판단된다.

대부분의 승객용 자동차들은 후면 유리가 비스듬한 각도로 기울어 있는데, 이는 자동차 스타일링 관점에서 절벽처럼 똑 떨어지는 형상 보다는 친근히 비스듬히 떨어지는 후면 유리 라인이 미적으로 뛰어나다고 받아들여지고 있기 때문이다. 하지만 수직에 보다 가까운 후면 유리 적용을 통한 공력 성능 개선 및 그로 인한 연료 절감 효과, 트렁크 적재 부피 증대 등 여러 기능적 관점에서 판단하였을 시에는 기울어진 후면 유리는 그 존재의 타당성을 잃어버리게 된다. 디자이너들이 자동차 스타일링 작업시 후면 유리의 기울임 각도는 최소화 하는 동시에 미적으로도 조화로운 차체의 전체 측면 라인을 뽑는 디자인 전략을 세워보는 것도 좋을 것이다.

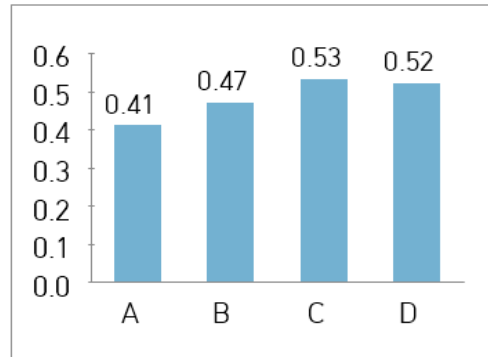


그림 4. 4가지 타입의 차체 측면 형태에 따른 공력 성능 (막대 위 수치는 Cd 값을 나타냄)

Figure 4. Result of experiment 1, Cd values of the four models tested

2. 차체 측면 유리창 각도에 따른 공력 성능 비교

실제 승객용 자동차들의 측면 유리는 수직으로 세워져있지 않고 차체 안쪽을 향해 기울어져 있다. 어떤 각도로 측면 유리를 기울였을 때 가장 공력 성능이 좋은지를 파악하기 위해 두 번째 실험에서는 C 타입(해치백 타입) 차체를 바탕으로 측면 유리의 기울어진 각도를 4가지 방식으로 달리 했을 때의 공기역학 성능의 변화를 살펴보았다.

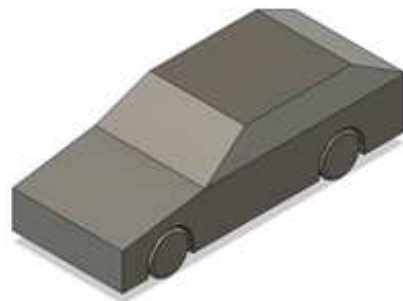


그림 5. C 타입 차체의 측면 유리를 수직 기준 15도 각도로 안쪽으로 커팅한 모델

Figure 5. C type model with side windows cut at the angle of 15 degrees

<그림 5>는 기본 C 타입의 차체에 수직 기준 15도 각도로 안쪽으로 커팅한 모델의 입체도이다. <그림 6>과 같이 4개의 각도(90도, 75도, 60도, 45도)로 옆 유리창을 잘라내었다. 일반적인 승용차의 측면 유리 각도는 60도에서 80도 사이에 맞춰져 있다.

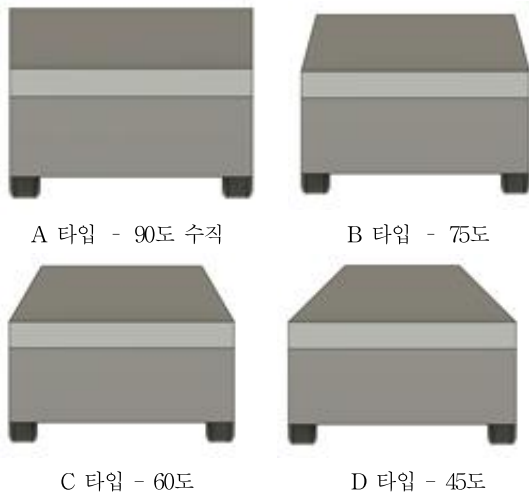


그림 6. 4가지 타입의 차체 측면 유리창 각도 설정
Figure 6. Four types of side window setting

실험 결과를 보여주는 <그림 7>을 살펴 보면, 측면 창을 기울이지 않은 A타입이 가장 높은 Cd 값(0.53)을 보였으며 극단적으로 45도까지 기울인 D타입이 가장 낮은 Cd 값(0.5)을 나타내었다. 측면 창을 45도 기울이는 것 만으로 5.7% 공력 성능 개선이 이루어졌으며 이는 고속 주행시 4%에 달하는 연비 개선이 이루어 질 수 있음을 의미한다. 일반적인 측면 창을 기울여짐 각도를 적용한 B, 와 C 타입의 경우도 A 타입 대비 3.8%의 공력 개선이 이루어졌으며 이는 2.7%에 달하는 연비 개선을 의미한다.

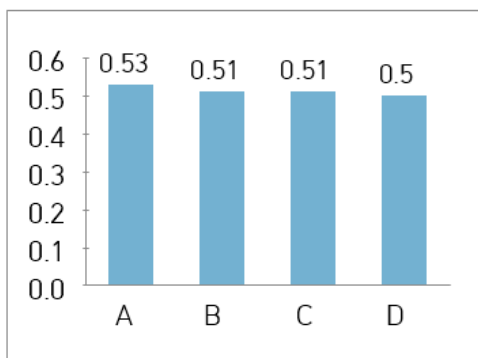


그림 7. 4가지 타입의 차체 측면 유리창 각도 설정에 따른 공력 성능 (막대 위 수치는 Cd 값을 나타냄)
Figure 7. Cd values of the four types of side window setting

3. 엔진 후드의 각도 변화에 따른 공력 성능 비교
세 번째 실험에서는 자동차의 날렵한 옆선을 결정짓

는 엔진후드의 각도가 자동차의 공력 성능에 미치는 영향을 알아보았다. 엔진후드는 기본적으로 엔진이 들어가는 공간을 덮는 덮개인데, 엔진 자체가 상당한 부피를 차지하기 때문에 전방에 엔진이 탑재되는 자동차들의 경우 날렵한 디자인을 위해 마냥 엔진 후드의 전방 각도를 제약 없이 낮출 수는 없다. 빠른 속도를 자랑하는 스포츠카의 경우 전방 각도를 극도로 낮추기도 하는데 이런 경우의 스포츠카들은 대부분 엔진이 차량의 후방에 위치하기에 가능하다.

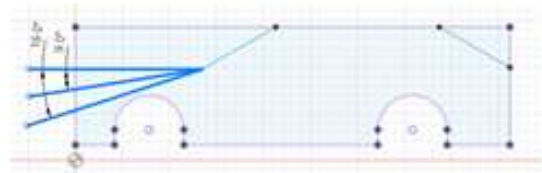


그림 8. 엔진후드의 각도 설정 (0도, -9도, -18도)
Figure 8. Angle setup of the engine hood (0, -9, -18 degree)

세 번째 실험에서는 <그림 8>과 <그림 9>에서 보여지듯 다른 요소들은 배제한 채 3가지 각도 (0도, -9도, -18도)의 엔진 후드를 적용한 차체 모델링 데이터를 사용해 시뮬레이션을 돌려 보았다.

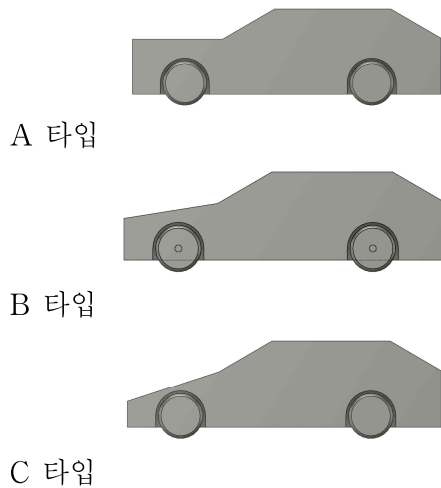


그림 9. 실험 3에 사용된 세 개의 서로 다른 엔진후드 각도를 적용한 차체의 측면도
Figure 9. Side view of the vehicles with three different engine hood angles applied

수평의 엔진후드를 갖는 A타입의 Cd 값은 0.62로 나타났으며, 18도만큼 전방을 향해 아래로 기울인 엔진후

드의 C타입의 경우 0.45의 Cd값을 기록해 무려 27.4%의 개선이 이루어 졌음을 알 수 있다. 엔진후드의 각도 설정은 이번 연구에서 실험한 단일 디자인 요소로는 공력 성능에 가장 큰 영향을 미치는 아이템임을 확인할 수 있었다. 연비 개선 측면에서 이야기를 해보면, 엔진 후드의 각도를 단지 18도 내리는 것만으로 영구적으로 19.2%의 연비 개선을 가져오게 되는 것이니 자동차 디자인이 설정한 자체의 조형 라인 하나하나가 자동차 운행 성능, 더 나아가 지구의 환경에 엄청난 영향을 미친다는 사실을 지각하고 책임의식과 자부심을 가지고 조형 작업을 해야 할 것이라 사료된다.

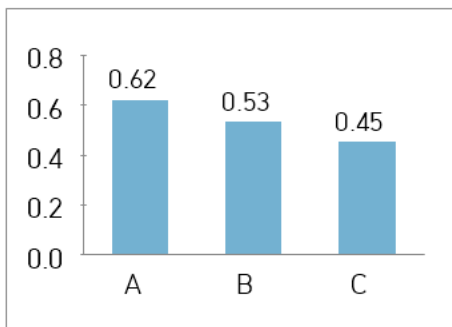


그림 10. 세 가지 서로 다른 엔진후드 각도 적용 차량의 공력 성능 (막대 위 수치는 Cd 값을 나타냄)
 Figure 10. Cd value results of the three different engine hood angle setting

4. 차체의 루프(roof) 각도에 따른 공력 성능 비교

공력 성능이 중요한 스포츠카의 경우 날렵한 엔진후드 각도의 적용과 함께 날렵하게 떨어지는 루프(차체의 지붕)를 적용하는 경우가 대부분이다. 실제로 날렵하게 떨어지는 루프라인이 공력 성능의 개선에 도움이 되는 지 알아보기 위해 총 세 가지의 루프 라인을 적용한 차체 데이터로 실험을 하였다.

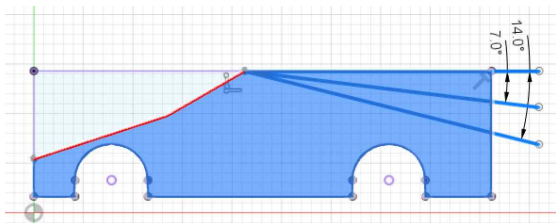


그림 11. 루프(roof)의 각도 설정 (0도, -7도, -14도)
 Figure 11. Angle setup of the roof (0, -7, -14 degree)

세 번째 실험에서 가장 좋은 공력 성능을 보인 C타입 차량 데이터에 수직 후면 유리 각도를 설정한 차량 데이터를 이번 실험의 A 타입으로 설정하였고 A 타입에서 루프라인을 7도 내린 B 타입 및 14도 내린 C 타입을 설정하여 실험하였다. 세 가지 타입의 측면도는 <그림 12>와 같다.

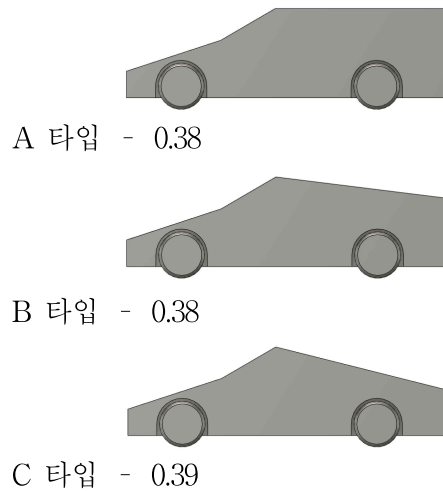


그림 12. 실험 4에 사용된 세 개의 서로 다른 루프(지붕) 각도를 적용한 차체의 측면도
 Figure 12. Side view of the vehicles with three different roof angles applied

실험 결과 예상과는 달리 자동차 루프의 각도 차이에 따른 공력 성능 차이<그림 13>는 거의 나타나지 않았으며, Flow Design 소프트웨어 분석 과정에서 보여지는 수렴 그래프의 지속 관찰 결과 오히려 루프 라인을 내리지 않은 왜건형 타입(A 타입)이 여전히 미묘하게 나은 성능을 보여주었다.

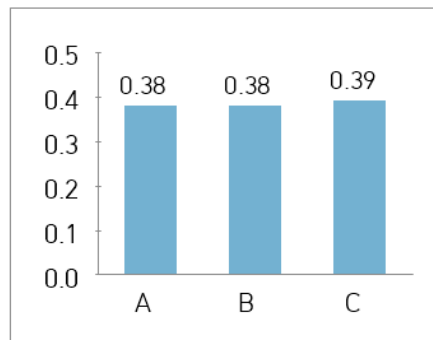


그림 13. 세 가지 서로 다른 루프 각도 적용 차량의 공력 성능 (막대 위 수치는 Cd 값을 나타냄)
 Figure 13. Cd value results of the three different roof angle setting

4. 후방 디퓨저 적용에 따른 공력 성능 변화

자동차의 공력 성능 개선 부품 중 후방 디퓨저의 기능은 바닥의 압축되어 있는 공기 배출을 도와 차체 바닥을 보다 낮은 압력 상태로 만들어 다운포스(차체를 누르는 힘, 차체를 눌러주어 코너링시 안정감을 증가)를 증가시키고 항력(Cd 값으로 측정)을 낮추는 역할을 한다 [4] [5]. 최종 성능 최적화를 위한 후방 디퓨저의 기능을 적용시키기 위해 그림 xx와 같이 20도 각도로 차량의 뒤쪽 하부를 잘라낸 입체 모형으로 시뮬레이션 테스트를 진행하였다. 최종 측정 결과, 예상과는 달리, 증가한 Cd 값 0.42를 기록하였는데 이는 디퓨저를 적용하지 않은 모델 보다 11% 높은 값이었다.

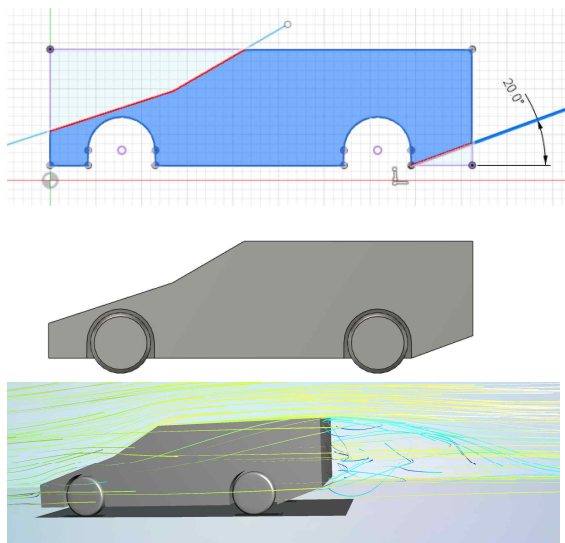


그림 14. 디퓨저 적용 차량의 각도 설정 및 유동 시각화
Figure 14. Images of diffuser applied model

IV. 결론

본 시뮬레이션 실험 연구를 통해 아래와 같은 발견점을 얻을 수 있었다.

1. 비스듬히 떨어지는 후면 유리 라인은 공력 성능에 나쁜 영향을 미친다.
2. 루프의 각도 차이에 따른 공력 성능 차이는 거의 나타나지 않았다.
3. 일찍 떨어지는 후면 라인은 공력 성능에 악영향을 끼치지 않으면서 날렵한 느낌의 스타일링에 도움이 된다. 단 일찍 떨어지는 루프라인은 승객 탑승 공간의 높이 확보에 문제를 도출하게 된다.

4. 루프라인이 수평으로 늦게까지 이어지다 천천히 떨어지는 후면 유리 라인은 스타일링에 도움이 될지인정 공력 성능에는 악영향을 미친다.

5. 차체의 형태에 따라 디퓨저 적용시의 공력 성능 효과가 달라지는 것으로 판단된다.

본 실험 연구에서는 차체의 형태를 결정짓는 다양한 디자인 요소들의 설정 값을 달리하여 비교 분석해 보았다. 차체의 디자인을 결정짓는 선 하나하나의 차이로 인해 차량의 성능 및 연비에 큰 영향을 미침을 실험 수치들을 통해 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 다양한 차체의 형태에 꼭 필요한 특징만을 단순화시켜 적용 제작한 차량 3D 데이터를 가지고 실험하였다는 한계점을 갖고 있다. 후속 연구에서는 보다 정교하게 모델링되어 보다 실제 차량에 가까운 디테일을 갖는 차량 데이터로 실험을 진행해 본 연구에서 발견된 시사점들을 바탕으로 더욱 다양한 디자인 아이템들을 적용한 차량을 실험하여 자동차 디자이너에게 도움이 되는 공력 가이드라인 제공 연구의 폭을 넓혀보고자 한다.

References

- [1] Sunguk Lee, Byungjoo Park, "Study for Zero Emission Vehicle Technology : Current Status and Recent Trends", The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT), Vol. 5, No. 1, 377-384. 2019.
<http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.1.377>
- [2] Jungdo Kee et al., "Vehicle Styling and Aerodynamics", Auto Journal, 32-41, 2013.
- [3] Jeongmin Kim, "Multidisciplinary Research on the Effect of Various Design Components on CFD Aerodynamics Performance of passenger vehicle", The Korean Society of Science & Art, Vol. 38, No. 1, 25-35, 2020.
<http://doi.org/10.17548/ksaf.2020.01.30.25>
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuser_\(automotive\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Diffuser_(automotive))
- [5] O. H. Ehirim et al., "A Review of Ground-Effect Diffuser Aerodynamics", Journal of Fluids Engineering, Vol. 141, No. 1, 1 - 45, 2018.