

유동 제어 장치를 이용한 상용차량의 항력저감 연구

김성호* · 김정재†

Study on drag reduction of commercial vehicle using flow control device

S. H. Kim* and J. J. Kim†

Abstract The primary challenge in improving fuel efficiency and reducing air pollution for commercial vehicles is reducing their aerodynamic drag. Various flow control devices, such as cab-roof fairing, gap fairing, cab extender, and side skirt have been introduced to reduce drag, however, the drag reduction effect and applicability are different depending on each commercial vehicle model. To evaluate the fuel consumption of heavy vehicles, a comprehensive research approach, including drag force measurement, flow field analysis is required. This study investigated the effect of a cab extender, which installed rear region of cab, on a drag coefficient of commercial vehicle through wind tunnel experiments and CFD. The results showed that the cab extender significantly modified the flow structure around the vehicle, leading to 8.2% reduction in drag coefficient compared to the original vehicle model. These results would provide practical application for enhancing the aerodynamic performance and fuel efficiency of heavy vehicle.

Key Words : Cab extender(캡 익스텐더), Drag reduction(항력 저감), Aerodynamics(공기역학), Fuel saving(연비 개선), Flow visualization(유동가시화)

1. 서론

최근 세계 각국에서는 물류비용 중 가장 큰 비중을 차지하는 화물차량의 유류비를 절감하기 위해 다양한 기술을 개발하고 있다⁽¹⁾. 그 중 화물차의 연비개선을 통한 운송 유류비 저감 기술은 비용 대비 효과가 매우 크며 환경적 측면에서 온실가스 감축 목표 달성에도 필수적이다. 특히, 화물

차량의 공기저항을 줄이는 것은 내연기관 차량 외에 최근 생산 중인 전기차의 경우에도 충전 및 주행거리 향상에 매우 중요한 역할을 할 수 있다.

주행중인 화물차는 유동 박리에 의해 전면부에 상대적 고압, 후면부에 저압영역이 발생한다. 이러한 압력의 차이는 차량의 항력을 증가시켜 연비를 악화시키는 효과를 낳는다. 항력의 경우 속도의 제곱에 비례하여 증가하는 경향을 가지고 있다. 이러한 항력은 차량의 연비 및 주행 안정성을 포함한 차량 성능에 크게 미치기 때문에 항력을 줄이기 위한 많은 연구들이 진행되었다^(2,3).

화물차 항력 저감과 관련하여 주로 진행된 연구는 트랙터-트레일러^(4,5), 15톤^(6,7,8) 및 5톤⁽⁹⁾차량으로 비교적 대형 화물차량에 관하여 진행되었

† Department of mechanical engineering, Hanbat national university, Assistant professor
E-mail: jjk11@hanbat.ac.kr

* Department of mechanical engineering, Hanbat national university, Undergraduate student
E-mail: cvb5571@gmail.com

다. 2021년 기준 국내에 등록되어 있는 화물차량의 약 87%는 3톤급 미만으로 소형 화물차량에 관련된 연구도 분명히 필요하다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에서 가장 흔히 볼 수 있는 H사의 소형 화물차량을 대상으로 선정하였다. 항력저감 장치로 운적석 후면부이자 적재함 상부에 장착하는 캡 익스텐더를 설계하였으며, 전산 유체해석을 통해 효과적인 캡 익스텐더의 길이와 각도를 도출하고 유동구조 변화를 비교하였다. 또한, 축소 모델에 대한 풍동 실험을 통해 캡 익스텐더의 항력 저감 효과를 검증하였다.

2. 모델 및 방법

2.1 차량 및 캡 익스텐더 모델

본 연구에서는 H사의 소형 화물차량을 실험 모델로 선정하여 1/8 축소 모델을 제작하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서 제안한 캡 익스텐더 모델의 측면도, 평면도와 기본 모델 차량에 부착한 모습을 Fig. 1에 나타내었다. 이때, 차량의 높이는 248mm, 폭은 215mm, 길이는 625mm로 측정되었다. 캡 익스텐더의 높이와 폭은 적재함의 규격에 맞춰 고정되었으며, L 은 차량에 부착된 캡 익스텐더의 길이이고, L_0 는 적재함의 총 길이이자 캡 익스텐더의 최대 장착 가능 길이로 360mm이다. 캡 익스텐더의 길이는 적재함 총 길이로 나누어 L/L_0 로 무차원화 하여 표현하였다. 또한, 은 캡 익스텐더 상부와 적재함이 이루는 각도를 의미한다.

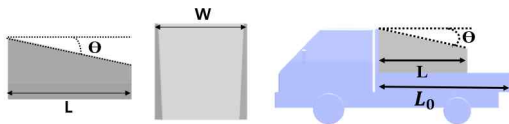


Fig. 1. Schematic illustrations of the side, top and side views of the boattail attached to the truck model.

2.2 해석 방법

유동해석은 Ansys Fluent를 사용하여 3차원 정상 상태 해석으로 진행하였다. 차량의 전면부의

풍동 입구를 velocity-inlet, 후면부의 풍동 출구를 대기압 조건의 pressure-outlet, 주위의 네 벽면을 no-slip 조건으로 설정하였다. Test section의 크기는 추후에 풍동 실험결과와의 비교를 위해 POSTECH 아음속 풍동의 test section과 같은 폭 1.8m, 높이 1.5m, 길이 4.3m으로 해석 영역을 결정하였으며, 이때 폐쇄율은 약 2%로 계산되었고 풍동의 outlet에서 역류가 발생하지 않는 길이임을 확인하였다. 난류 모델은 standard k-ε 모델로 해석을 수행하였고 주행 속도를 고려하여 입구 풍속은 100km/h로 설정하였다. 항력계수는 다음 식(1)을 이용하여 도출하였다.

$$C_D = 2F_D / \rho v^2 A \quad (1)$$

이때, F_D 는 항력, ρ 는 공기 밀도, v 는 입구 풍속, A 는 차량의 단면적이다.

2.3 실험 방법

POSTECH 아음속 풍동을 이용하여 1/8 축소 모델에 대해 캡 익스텐더 유무에 따른 항력 측정 실험을 진행하였다 (Fig. 2). 풍동 test section은 폭 1.8m, 높이 1.5m, 길이 4.3m이며, 최대 풍속은 75m/s, 난류강도는 0.2%, 균일도는 0.25%로 화물차량의 항력 측정 실험에 적합한 풍동이다. 차량에 작용하는 힘과 모멘트를 측정하기 위해 독일 항공우주연구청(DLR)에서 공력 측정용으로 제작한 KME3, 7-component 분력계를 이용하여 측정하였다. KME3로부터 나오는 7개의 스트레인 게이지 신호로부터 8개의 전압 증폭기를 통해 디

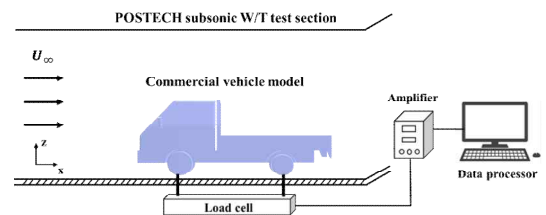


Fig. 2. Schematic diagram of the wind tunnel test section and drag measurement system consisting of a 7-component balance, an amplifier, and a data processor.

지털 전압계로 입력되고 이를 PC로 전송하여 자체 calibration matrix를 이용하여 각 성분의 힘과 모멘트를 측정하였다. 풍동 내의 유속은 FCO510의 micro-manometer를 시험부의 천장의 피토판에 연결하여 모니터링 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동해석 결과

캡 익스텐더를 부착하지 않은 화물차량의 항력 계수를 측정하기 위한 해석을 수행했을 때, 항력 계수는 0.656으로 계산되었다. 기본 모델의 항력 계수가 기존 과 유사함을 확인한 후 캡 익스텐더를 장착한 모델에 대한 해석을 진행하였다. 길이에 따른 항력계수 변화를 비교하기 위해 무차원 길이 $L/L_0 = 0.33 - 1.00$ 범위에서 해석을 수행하였다. Table 1은 캡 익스텐더 길이 (L/L_0)에 따른 항력계수 및 저감율을 나타낸다. 캡 익스텐더의 길이 L/L_0 가 0.63까지 증가할 때까지 항력계수는 감소하는 경향을 보였고, 이후로는 항력계수가 다시 증가하여 $L/L_0 = 1$ 일 때는 기본 모델에 비해 항력계수가 더 크게 나타났다. 따라서 캡 익스텐더 길이 $L/L_0 = 0.63$ 에서 약 5.6%의 최대 항력감소 효과를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1. Drag coefficient and drag reduction ratio according to cab extender length

Cab extender length (L/)	Drag coefficient	Drag reduction ratio (%)
Ref	0.656	-
0.33	0.625	4.7
0.50	0.6194	5.5
0.63	0.6188	5.6
0.67	0.631	3.8
0.75	0.638	2.6
1.00	0.657	-0.2

$L/L_0 = 0.63$ 에서 캡 익스텐더의 각도(θ)를 변화하여 해석을 진행했다. 캡 익스텐더의 각도에 따른 항력계수 및 저감율을 Table 2에서 나타내었다.

Table 2. Drag coefficient and drag reduction ratio according to cab extender angle in cab extender length (L/L_0) of 0.63

Cab extender angle (°)	Drag coefficient	Drag reduction ratio (%)
Ref	0.656	-
0	0.619	5.6
6.25	0.617	5.9
12.5	0.605	7.8
15	0.602	8.2
17.5	0.605	7.8
20	0.612	6.7

캡 익스텐더의 각도가 15°까지 증가할 때, 항력 계수가 감소하였고 이후 다시 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 결과를 통해 $L/L_0 = 0.63$, $\theta = 15^\circ$ 의 캡 익스텐더에서 항력계수가 가장 낮은 것을 확인하였고, 기본 모델과 비교하여 최대 약 8.2%의 항력계수 저감율을 가지는 것을 확인하였다.

캡 익스텐더를 부착하였을 때 항력 저감 메커니즘에 대해 밝히기 위해 기본 모델과 최대 항력 감소 효과를 보인 캡 익스텐더 ($L/L_0 = 0.63$, $\theta = 15^\circ$)를 부착한 모델의 유동구조를 비교하였다. Fig. 3는 캡 익스텐더 부착 유무에 따른 속도장을 비교하여 나타낸다. 기본 모델의 경우 캡 후면부 및 적재함 상부에 급격한 형상 변화로 유동 박리가 발생하여 재순환 영역이 생긴 것에 반해 캡 익스텐더를 부착한 경우, 유동 박리가 지연되고 재순환 영역이 감소한 것을 확인할 수 있다.

캡 익스텐더 부착 유무에 따른 압력장을 Fig. 4에서 비교하였다. 캡 익스텐더를 부착한 모델의 경우 차량 전면부와 후면부의 압력차가 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 캡 익스텐더의 부착으로 유동 박리가 지연됨에 따라 후면부의 압력 강하를 감소시켜 전체 차량의 항력이 저감된 것으로 볼 수 있다. 또한, Fig. 5에서는 두 케이스의 난류 운동에너지를 비교하였다. 난류 운동에너지가 높은 영역이 넓을수록 유동의 에너지 손실이 큰 것을 의미하며 이는 차량에 작용하는 항력이 더 큰 것을 의미한다. 따라서 캡 익스

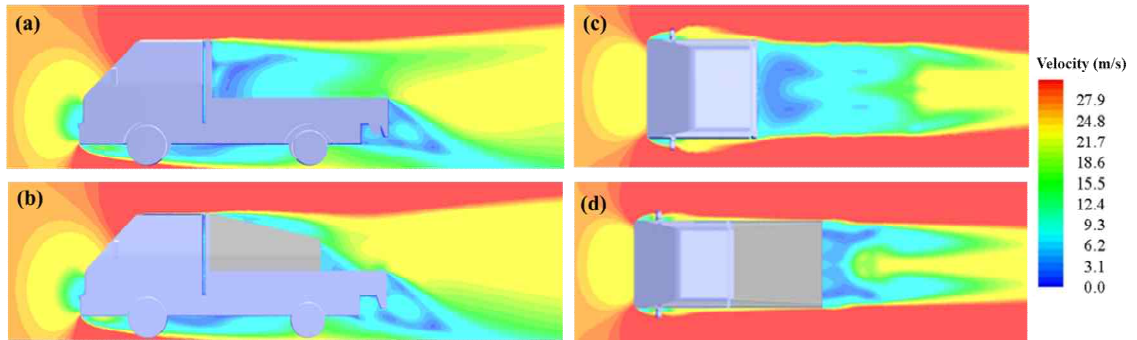


Fig. 3. Contour plots of mean velocity in x-z plane (a) without cab extender and (b) with cab extender, and mean velocity in x-y plane (c) without cab extender and (d) with cab extender.

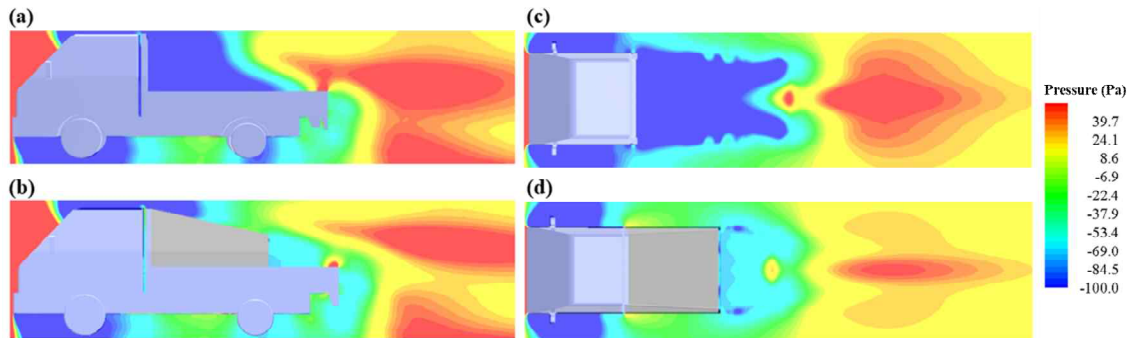


Fig. 4. Contour plots of mean pressure in x-z plane (a) without cab extender and (b) with cab extender, and mean pressure in x-y plane (c) without cab extender and (d) with cab extender.

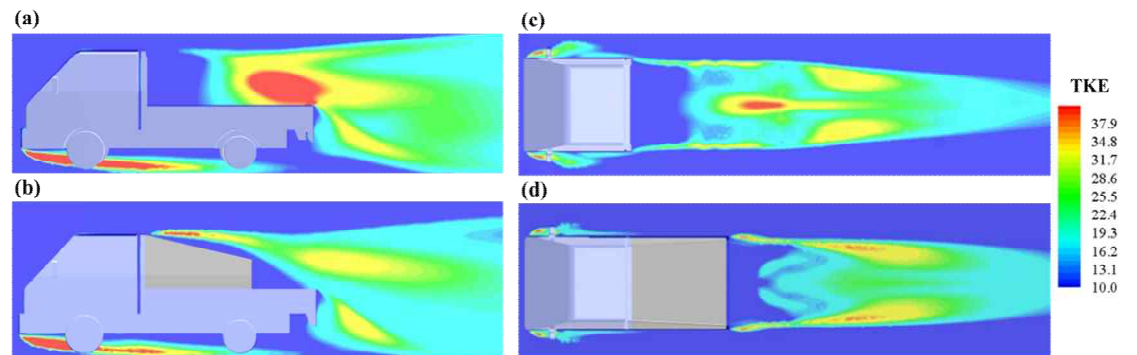


Fig. 5. Contour plots of turbulent kinetic energy in x-z plane (a) without cab extender and (b) with cab extender, and turbulent kinetic energy in x-y plane (c) without cab extender and (d) with cab extender.

텐션이 장착된 경우 차량 후면부에서 발생하는 난류 운동에너지 강도가 상대적으로 낮은 것으로 항력 감소를 유추할 수 있다. 또한 난류 운동 에너지는 유체의 fluctuation 성분으로 차량의 진

동 및 주행안정성과도 연관 되어있다. 캡 익스텐션을 통해 적재함 상부에서 발생하는 강한 난류 에너지영역을 감소함으로써 주행안정성 개선 효과를 기대할 수 있다.

3.2 풍동실험 결과

유동해석 결과에 대한 검증을 위해 풍동에서 항력 측정 실험을 진행하였다. 선행 에서 약 25m/s 이상인 조건에서 Reynolds independent 영역으로 풍속에 상관없이 항력 계수가 거의 일정하게 나타나는 것을 참고하여 본 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정한 후 3회 반복 실험을 통해 측정된 후 평균값을 계산하여 비교하였다. 캡 익스텐더의 길이에 따른 해석 및 실험 결과를 Table 3에서 비교하였다. 전체적으로 해석으로 도출된 항력 계수값이 풍동 실험 결과에 비해 더 높게 도출되어 약 5% 내외의 차이를 나타내었다. 이러한 차이의 원인으로 역 설계 과정에서 완전한 기하학적 상사가 이루어지지 않았고, 작은 디테일 형상의 단순화 과정에서 라운딩 부분 형상이 단순화되면서 해석결과가 풍동 실험 결과에 비해 더 높은 값을 나타내는 것으로 예상된다. 값 자체에는 차이가 존재하지만 해석 결과와 마찬가지로 실험결과도 길이가 증가함에 따라 항력 계수가 감소하는 것을 확인하였다.

Table 3. Differences in Drag coefficient between simulation and experiment according to cab extender length.

Cab extender Length (L/L_0)	Drag Coefficient (CFD)	Drag coefficient (Experiment)	Difference (%)
Ref	0.656	0.617	5.9
0.33	0.625	0.606	3.1
0.5	0.619	0.598	3.4
0.63	0.619	0.589	4.8

해석결과와 마찬가지로 무차원화 된 길이 0.63에서 가장 낮은 항력계수 값을 보이는 것을 확인하였고, 그 길이의 각도를 변화시킨 캡 익스텐더를 부착하여 실험을 진행했다. Table 4은 각도에 따른 항력계수와 저감율이다. 위의 결과와 마찬가지로 해석의 결과가 항력계수를 더 높게 측정하였지만 해석 결과와 유사하게 15°의 각도의 각도까지는 항력계수가 감소하였지만 그 이후에서는 항력계수가 증가하는 경향을 보였다. 실험 결과에서 역시 무차원 길이 $L/L_0 = 0.63$, $\theta = 15^\circ$

의 캡 익스텐더에서 항력계수가 가장 낮은 것을 확인하였고 기본 모델과 비교하여 약 6%의 항력 계수 저감율을 나타내는 것을 확인하였다.

Table 4. Differences in drag coefficient between simulation and experiment according to cab extender angle in cab extender length (L/L_0) of 0.63.

Cab extender angle (°)	Drag coefficient (CFD)	Drag coefficient (Experiment)	Difference (%)
0	0.619	0.589	4.8
6.25	0.617	0.588	4.7
12.5	0.605	0.582	3.8
15	0.602	0.580	4.7
17.5	0.605	0.592	2.2
20	0.612	0.606	1.1

4. 결론

본 연구에서는 국내에서 가장 흔히 볼 수 있는 소형 화물차량의 항력 저감 장치로 캡 익스텐더를 제안하였다. 캡 익스텐더의 길이, 각도에 따라 차량 모델의 항력계수 변화에 대해 비교하였고 무차원 길이 $L/L_0 = 0.63$, 각도 $\theta = 15^\circ$ 에서 가장 낮은 항력계수를 나타냈다. 해석을 통한 항력계수 저감율은 8.2%, 풍동 실험에서의 저감율은 6% 감소 효과를 확인하였다. 캡 익스텐더 부착 유무에 따른 평균 속도장, 압력장, 난류 운동 에너지 비교를 통해 캡 익스텐더의 항력 저감 메커니즘에 대해 밝혔다. 캡 익스텐더 부착으로 유동 박리가 지연되고 재순환영역을 감소시켜 차량 전/후면부의 압력차를 줄여 항력을 저감 시킨다는 것을 밝힐 수 있었다. 본 연구를 통해 국내 화물차량에 대부분을 차지하는 소형 화물차량에 대한 항력 저감 장치를 제안하였다. 제안한 캡 익스텐더는 실험한 모델의 화물차량 뿐 아니라 적재함이 개방된 형태의 차량에서도 차량 형상에 맞춰 유사하게 적용할 수 있을 것으로 보인다. 본 연구에서 제안된 캡 익스텐더는 제작 및 설치에 용이하도록 단순한 평판 형태로 설계하였으나, 추후 유선형 구조로 개선한다면 항력 저감 효과를 더 높일 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-004) 및 이공분야 기초연구사업(NRF-2021R1G1A1093148)의 결과입니다.

REFERENCE

- 1) Roy S. and Srinivasan P., 2000, External Flow Analysis of a Truck for Drag Reduction, SAE International, Vol.109(2), pp.808~812.
- 2) Buchheim R., Deutenbach K. R. and Luckoff H. J., 1981, Necessity and Premises for Reducing the Aerodynamic Drag of Future Passenger Cars, SAE International, Vol. 90(1), pp.758~771
- 3) Cooper K. R., 2004, Commercial Vehicle Aerodynamic Drag Reduction: Historical Perspective as a Guide, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics, Vol.19, pp.9~28
- 4) Kim J. J., Kim J. J., Han T. S., Kim D. W., and Lee S. J., 2017, Considerable Drag Reduction and Fuel Saving of a Tractor-trailer using Additive Aerodynamic Devices, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.191, pp.54~62.
- 5) Seyhan M., and Sarioglu M., 2021, Investigation of Drag Reduction Performance of half NACA 0009 and 0012 Airfoils placed over a Trailer on the Flow around Truck-trailer, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.35(7), pp.2971~2979.
- 6) Lee S. S., Kim M. K., You D. H., Kim J. J., and Lee S. J., 2016, Coarse Grid Large-eddy Simulation of Flow over a Heavy Vehicle, Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 21(1), pp. 30~35.
- 7) Lee E. J. and Lee S.J., 2017, Drag Reduction of a Heavy Vehicle using a Modified Cab Extender with lower Inclined Air Deflector, Journal of the Visualization Society of Japan, Vol.20, pp.743~752.
- 8) Kim J. J., Lee E. J. and Lee S.J., 2020, Wind Tunnel Tests on Drag Reduction of Heavy Vehicles using Sinusoidal Cab Extenders, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol.34(1), pp.201~208.
- 9) Lee E. J., Hwang B. G., Kim J. J. and Lee S. J., 2015, Wind tunnel study on drag coefficient of a 5 to truck using additive devices, Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 13, No. 1, pp. 9~14.
- 10) Hwang J. B., Park J. M., Song J. S. and Kim J. H., 2021, Experimental study on drag reduction of helmet for paragliding, Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 19, No. 3, pp. 46~53.
- 11) Kim S. Y., Choi J. W. and Kim S. C., 2010, Computational Flow Analysis around Coaxial Rotor Blades with Various Ducts, Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 8, No. 2, pp. 23~30