

유동제어용 부착물을 이용한 5톤 화물차의 항력 감소에 관한 실험적 연구

이의재* · 황배근* · 김정재* · 이상준*†

Wind tunnel study on drag reduction of a 5 ton truck using additive devices

EuiJae Lee*, BaeGeun Hwang*, JeongJae Kim* and SangJoon Lee*†

Abstract. There have been many attempts to reduce the cost of transportation. Especially, drag reduction of heavy vehicles has enormous influence on energy saving by reducing the driving power of the vehicles. In this study, the effects of drag-reducing additive devices such as side skirt, boat tail and cab-roof fairing on the drag reduction of a 5 ton truck model were experimentally investigated. The aerodynamic performance of these flow-control devices attached to heavy vehicle was evaluated through wind tunnel test. In addition, flow patterns around the truck model were visualized by using smoke tube method. The drag coefficient is reduced by up to 5.7%, 7.16% and 22.2% by the side skirt, boat tail and cab-roof fairing, respectively. The interactive effect of the side skirt and boat tail was also investigated.

Key Words : Drag reduction(항력감소), Truck(화물차), Side skirt(사이드 스커트), Boat tail(보트 테일), Cab-roof fairing(캡루프 페어링)

• 기호설명

- F_x : Drag force (N)
- C_D : Drag coefficient
- δ : Angle of flap side skirt
- θ : Angle of folding side skirt
- ω : Angle of boat tail

1. 서론

세계 각국은 운송 과정에서 발생하는 물류 비용 중 가장 큰 비중을 차지하고 있는 화물차의 유류비를 절감시키기 위해 많은 노력을 기울이고 있다^{1,2)}. 우리나라도 고유가 시대에 대비하고 온실가스 감축 목표를 달성하기 위해 화물자동차의 연료 소비를 절감시킬 수 있는 기술 개발이 시급하다.

최근 화물자동차의 연료 소비를 줄이기 위해 차체의 기계적인 구조를 개선하여 차량의 경량화를 꾀하거나 내연

기관의 연비를 향상시켜 에너지 효율을 높이는 연구가 진행되고 있는데, 이런 방식은 혁신적 변화가 없으면 돌파구를 찾기가 힘들다. 그러나 화물자동차의 차체 외형 설계 혹은 차체 부착물을 이용하여 공기저항을 감소시키는 방법은 개선의 여지가 클 뿐만 아니라 투자 대비 효과가 우수하다고 할 수 있다³⁾. 또한 주행속도가 증가하면 공기저항이 주행 연비에 차지하는 비중이 커지게 되므로, 공기저항을 저감시키고자 하는 노력은 더욱 중요하다^{4,5)}.

공기저항 저감을 위해 화물차에 장착하는 대표적인 부착물로는 사이드 스커트(side skirt), 보트 테일(boat tail), 캡루프 페어링(cab-roof fairing) 등이 있다. 사이드 스커트는 트럭의 비퀴 사이의 측면 공간에 부착하는 스커트 형상의 구조물로 차량 하부에서 발생하는 공기저항 손실을 줄이는 역할을 한다. 캡루프 페어링은 트럭의 지붕 위에 설치하는 구조물로서 트레일러와 컨테이너 사이의 높이 단차를 줄여 공기 저항을 저감시키는 부착물이다. 보트 테일은 적체 공간인 컨테이너 후단부에 부착하는 구조물로

*† POSTECH, 기계공학과, 첨단유체공학연구센터

E-mail : sjlee@postech.ac.kr

* POSTECH, 기계공학과

써 유동박리(flow separation)에 기인하여 발생하는 와류와 공기저항을 감소시키는 역할을 한다.

기존의 실험적 연구 중에서 캐나다 National Research Council에서 진행한 프로그램이 가장 대표적인데, 실차를 이용하여 공기저항 저감장치를 부착한 후 항력 및 연료 소비 감소량을 조사하여 실험적 데이터를 축적하였다^(1,6). 그러나 주행 조건 및 국내에서 주로 운행하는 화물차와 형상이 다르기 때문에 직접적인 비교 적용이 어렵다는 단점이 있다. 다른 기존 연구는 형상이 간단한(GTS, GCM, Ahmed body)등에 대한 실험적 연구이거나 이들에 대한 RANS나 LES를 이용한 수치해석 연구가 대부분이다^(7,8).

본 연구에서는 우리나라에서 가장 많이 사용하는 화물자동차인 5톤 트럭을 대상으로, 차체에 사이드 스커트, 보트 테일, 캡루프 페어링과 같은 부가장치를 차체에 설치하여 화물차의 상단부에 걸리는 형상저항(pressure form drag), 차체 하부에서 발생하는 공기저항, 그리고 후미부에서 발생하는 유동박리에 기인한 공기저항을 제어함으로써 화물차의 공력특성 변화를 연구하였다. 이와 같은 공기역학적인 해석을 통해 화물차의 항력감소 메커니즘을 밝히고 저저항 운송체의 공력 설계기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 사이드 스커트의 형상 및 각도, 보트 테일의 길이와 각도 등 다양한 실험변수를 변화시키면서 화물차에 걸리는 공력계수(C_D)값을 측정하고, 화물차 상단부 및 후미부 주위 유동 변화를 가시화하여 유동구조를 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 POSTECH 이음속 풍동은 폐쇄형(closed circuit)으로 시험부의 높이는 1.5m, 폭 1.8m, 길이 4.3m이고, 최대풍속은 75m/s이며 난류강도(turbulence intensity)는 0.2%, 균일도(flow uniformity)는 0.25%로 운송체 공력 실험에 적합한 풍동이다. 본 실험에 사용된 실험 모델은 국내에서 가장 많이 운행되고 있는 H사의 5톤 트럭을 실측을 통한 역설계 방식으로 3D 모델링을 한 후, 이를 풍동 시험부의 폐색율(blockage ratio) 기준에 맞추어 1/6 스케일 축소 모형으로 제작하였다⁽⁹⁾. 사용되어진 실험 모델의 치수와 모형사진은 Fig.1과 같다.

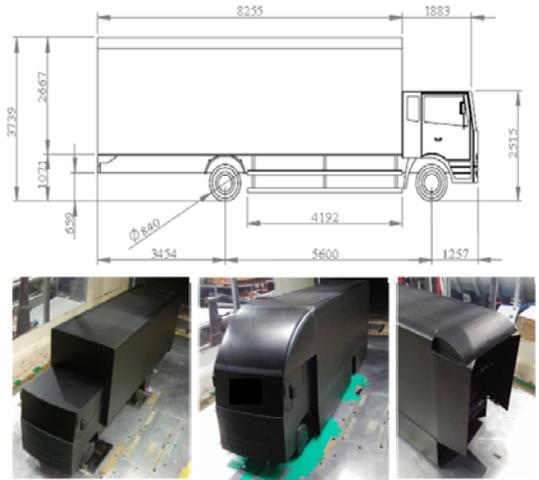


Fig.1. Schematic and photograph of a 5ton truck model.

Fig.2는 설계 변수를 사이드 스커트의 도식화한 것으로, Fig.2 (a)는 일반적인 평평한 사이드 스커트로 바퀴 타이어의 흠판이 부분의 높이에 맞게 제작하였다. 이때 사이드 스커트의 높이(H)에 따라 S, L형으로 구분하였다. Fig.2 (b)는 타이어 부근에서 꺾인 플

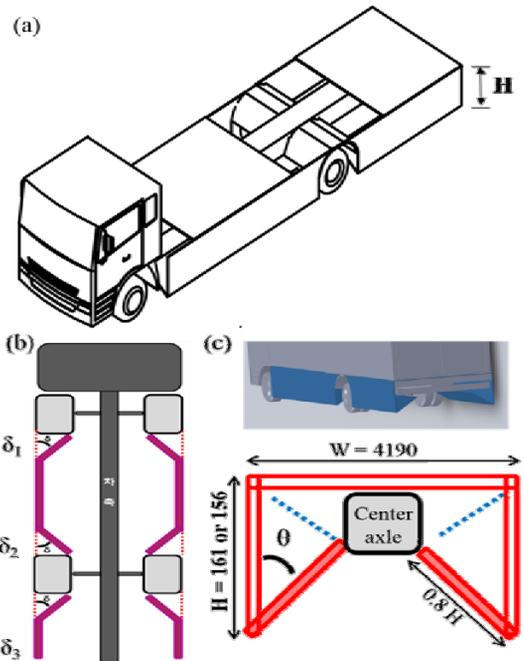


Fig.2. Schematic diagram of side skirt tested in this study. (a) Standard side skirt, (b) angled-flap side skirt (c) folding side skirt.

랩(angled flap)을 가지는 사이드 스커트를 도식화한 것으로 차체 하부를 지나는 공기 흐름이 타이어와 충돌하지 않도록 하기 위해 타이어와 가까운 위치에서 사이드 스커트를 차체 안쪽으로 들임각(δ)를 가지도록 꺾었는데, 이 들임각을 15°, 30°, 45°로 변화시키면서 실험하였다. Fig.2 (c)는 경사진 플랩을 장착하여 차량 하부 구조물들과 충돌하여 지나가는 공기흐름에 기인한 항력을 저감시키는 접이식 사이드 스커트(folding side skirt)로 차체 하부 중앙 쪽으로 일정 각도(θ)로 경사지게 설치하고 경사각을 30°, 45°, 60°와 차축까지 연결한 경우(61.2°)로 변화시키면서 실험하였다.

보트 테일은 Fig.3에 나타난 것처럼 상판 3개의 길이(L)와 컨테이너 후미부에 부착되는 각도(ω)를 설계변수로 변화시키면서 항력을 측정하고 후류 유동의 변화를 관찰하였다.

2.2 실험방법

차체에 걸리는 힘과 모멘트를 측정하기 위해서는 차체에 작용하는 풍하중을 정밀하게 측정하여야 한다. 본 연구에서는 독일항공우주연구청(DLR) Braunschweig 분소에서 공력 측정용으로 제작한 KME3, 7-component 분력계를 이용하여 화물차체에 걸리는 항력을 측정하였다. KME3로부터 나오는 7개의 스트레인 게이지 신호로부터 8개의 전압 증폭기(PRE7600MX, Preston)를 통해 디지털 전압계(HP34410A)로 입력되고 이를 PC로 전송하여 자체 calibration matrix를 이용하여 각 성분의 힘과 모멘트를 측정하였다. 주유동 방향 힘의 항력 측정범위는 $F_x = \pm 500N$ 이고 분해능은 0.01N 이하이다. 본 실험에 앞서 보정 실험을 통해 3축성분의 힘과 3축성분의 모멘트들이 측정오차 0.2% 이내로 측정됨을 확인하였다.

유동가시화 실험은 $U_0 = 5m/s$ 에서 수행하였고, 독일 SAFEX 사의 2010 Fog generator에 차체 제작한 노즐을 사용하였으며, 제논(X_c) 램프를 광원으로 사용하고 Olympus사의 OM-D E M1 카메라로 촬영하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 공력특성

공기저항용 부가장치들을 장착하지 않은 기본 차

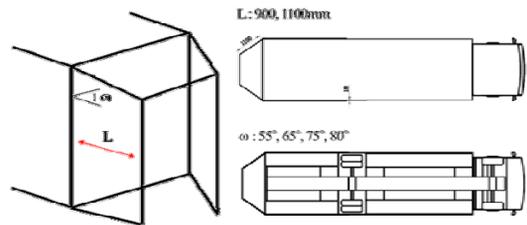


Fig.3. Schematic diagram of boat tail.

체를 대상으로 풍속을 10~55m/s 영역에서 변화시켜 가면서 트럭 모형에 가해지는 항력(F_x)을 측정하고, 항력계수를 구하였다(Fig.4). 측정 결과, 5톤 트럭에 가해지는 항력은 풍속이 증가함에 따라 속도의 제곱에 비례하여 증가함을 확인하였다. 항력계수는 0.701로 기존 연구결과와 잘 부합하였다. 그리고 25m/s (=90km/h) 이상인 조건에서는 풍속에 상관없이 거의 일정한 항력계수 값을 가짐을 확인하였다. 이것은 본 실험영역의 Re값이 $1.1 \sim 6.3 \times 10^6$ 로 임계 레이놀즈수 영역($\sim 10^5$)을 벗어나 풍속의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로, 이후 다른 실험변수들에 대한 실험에서는 풍속을 25m/s로 고정하고 3회 반복 측정된 후 통계 처리한 평균값을 사용하였다.

기본 5톤 트럭 모델에서 안전바(safety bar)를 제거하고 사이드 스커트를 장착한 경우에 대한 항력계수 변화를 Fig.5에 나타내었다. 표준형 사이드 스커트(S형)의 경우는 기본 모델에 비해 항력계수가 4.93% 저

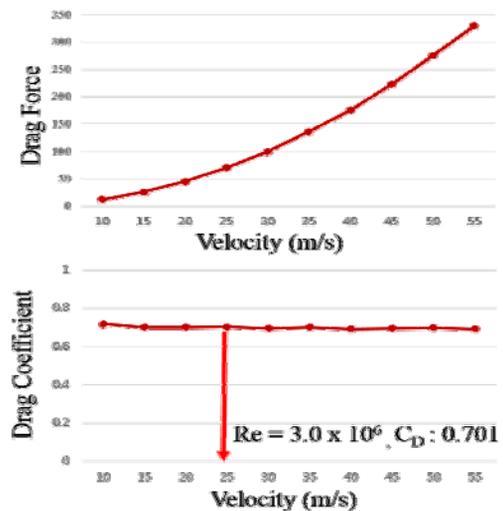


Fig.4. Variation of drag force and drag coefficient of the 5ton truck model according to wind velocity.

감되며, 스커트의 폭이 큰 L형의 경우 항력감소는 5.2%로 S형에 비해 공기저항 저감 효과가 크게 나타났다. 이것은 사이드 스커트 장착시 차체 하부에서 발생하는 공기 저항 및 타이어나 스커트 사이의 유동을 막아주어 항력이 저감 되는 것으로 해석된다.

타이어나 차체 안쪽으로 일정한 각도(δ)로 꺾인 플랩 (angled flap) 사이드 스커트의 경우 들임각 조합에 따라 항력 저감 효과가 다르게 관찰되었다. 실험 결과, $\delta_1 = 15^\circ$, $\delta_2 = 0^\circ$, $\delta_3 = 15^\circ$ 조합의 경우, 항력 계수(C_D)값이 0.662로, 기본 모델에 비해 5.7%로 감소하였다. 이것은 사이드 스커트의 꺾인 부분이 타이어나 후방에서 생성되는 와류를 억제하고 사이드 스커트에 걸리는 압력차에 기인하여 주행방향으로 힘을 받기 때문이다. 그러나 들임각 δ 가 30° 이상으로 커지게 되면 차체 하부로 흘러가는 공기흐름을 막아 오히려 항력저감 효과가 떨어졌다.

접이식 사이드 스커트의 경우, 예상과는 달리 접힌 부위 각도에 따른 변화는 크지 않고 스커트를 중앙에 위치한 차축부위까지 연결한 경우(61.2%)가 항력계수 0.666로 기본 모델 대비 항력계수가 5.1% 감소하였다. 이것은 차축까지 연결한 스커트가 차체 하부의 구조물을 가려 하부에서 공기흐름이 원활하기 때문으로 보인다.

차체 후미에 길이와 각도를 다르게 변화시킨 보트 테일을 장착하고 이것이 차체에 걸리는 항력계수에 미치는 효과를 Fig.6에 나타내었다. 실험 결과, 보트 테일의 길이 보다는 각도 변화에 따라 큰 차이를 보였다. 접힌 각도 $\omega = 55^\circ$ 인 경우 오히려 유동을 교란시켜 항력이 증가하였으며 각도(ω)를 증가시키기에 따라 항력 저감 효과가 개선되었다. 다양한 각도에 대한 실험을 통해 $\omega = 80^\circ$ 에서 항력 계수가 최대로 저감 되었는데, 보트 테일이 장착되지 않은 기본 모델에 비해 항력계수가 4.24% 감소하였다.

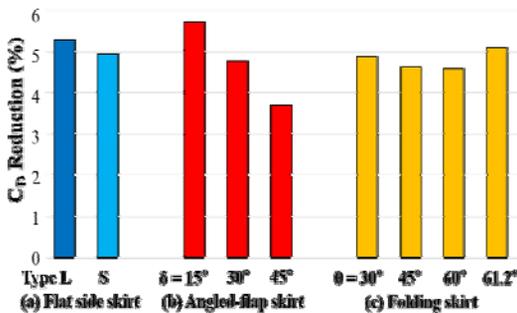


Fig.5. Drag reduction effects of various side skirts.

기존의 보트 테일의 경우 차체 후미부와 약간의 단차가 있어 유동박리가 보트 테일보다 앞쪽에 서 형성되어 효과적이지 못하다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 이 단차를 메우는 구조물(gap repair)를 장착한 결과 항력계수가 6.6% 저감되는 효과를 보였다. 그리고 차체 하부에서 발달하는 와류의 영향을 줄이기 위해 하부 유동을 제어하는 스포일러 형상의 구조물을 후미부 아래쪽에 설치한 결과 6.0%의 항력계수 저감 효과를 보였다. 이 두 가지 부가장치를 모두 장착한 경우, 항력계수는 0.652로 기본 모델에 비해 총 7.16%의 항력계수 저감 효과를 얻었다.

지금까지 여러 가지 다른 조건하에서 사이드 스커트와 보트 테일이 5톤 트럭의 항력저감에 미치는 효과 연구하였다. 이들 부착물들은 독립적으로 부착하는 것이 가능하므로 이들을 모두 함께 적용할 때 그 효과가 어떻게 변화하는지를 분석하였다.

먼저 꺾인 플랩 타입의 사이드 스커트에서 가장 좋은 항력 저감 효과를 보인 경우 ($\delta_1 = 15^\circ$, $\delta_2 = 0^\circ$, $\delta_3 = 15^\circ$)와 보트 테일, 캡루프 페어링을 모두 함께 적용 시켜본 결과, 각각의 실험결과를 합친 것과 유사한 결과를 얻었다. 이것은 각각의 부착물들이 독립적으로 작용하며 거의 간섭하지 않는 것을 나타낸다. 세 가지 부착물 중에서 캡루프 페어링이 전체 항력계수 저감 효과 34.88% 중 63% 이상을 차지하여 가장 큰 역할을 하는 것으로 나타났으며, 이를 통해 차체 상단부에 걸리는 항력이 가장 공기저항의 주요 요인임을 알 수 있다.

접이식 사이드 스커트와 보트 테일을 함께 부착한 경우에는 특이하게도 각각의 실험결과와의 합보다 항력계수 저감효과가 2.1% 크게 나타났다. 이것은 접이식 사이드 스커트의 경우, 바퀴와 바퀴 사이의 공기 저항뿐만 아니라 차체 하부 유동을 제어하는 효과도 있기 때문에 차체 하부 유동이 컨테이너 후미부의 유동에도 영향을 미쳐 시너지 효과를 보이는 것으로

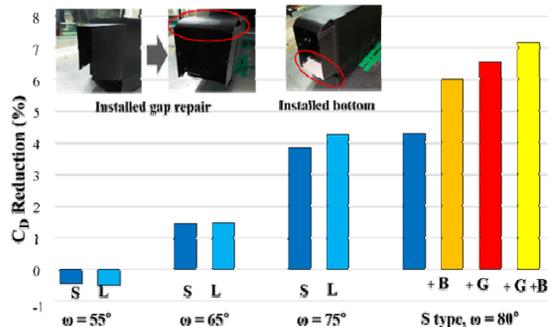


Fig.6. Drag reduction effects of various boat tails.

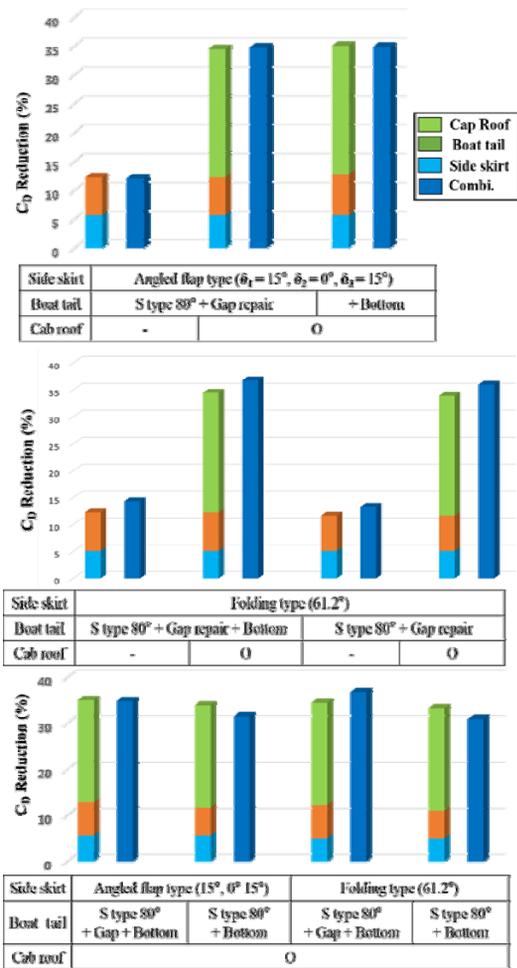


Fig.7. Drag reduction effects of combination of the best conditions for the side skirt, boat tail, cab-roof fairing.

생각된다. 캡루프 페어링의 경우에는 꺾인 플랩과 마찬가지로 독립적인 효과를 보이며 상호충돌이나 간섭효과는 나타나지 않았다.

마지막으로 기존 보트 테일이 부착된 차량의 후미부 단차를 메워주는 장치(gap repair)의 유무에 따른 다른 부착물과의 상호작용을 조사해본 결과, 꺾인 플랩을 가지는 사이드 스커트와 접이식 사이드 스커트 모두 각각의 항력계수 저감효과를 합한것보다 적은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이것은 캡루프 페어링과 갭 리페어 간에 사이의 상관관계에 기인한 것으로 갭 리페어를 부착하지 않은 경우 캡루프 페어링 장착으로 형성된 유선형 유동이 상대적으로 빨리 박리되어 갭 리페어 효과가 사라지기 때문으로 해

석된다.

3.2 유동가시화

공기저항 저감 장치를 장착한 트럭 주위의 유체 흐름을 관찰하고 이를 통해 항력저감 효과와 관련 유동구조를 정성적으로 파악하기 위하여 차체 주위 유동을 가시화하였다. Fig.8 (a)에서 볼 수 있듯이 캡루프 페어링이 장착되지 않은 경우 운전석이 위치한 트랙터 상단에서 박리(separation) 현상이 크게 일어나며 흐름의 일부가 컨테이너 상단에 부딪혀 압력 저하를 유발함을 보여주고 있다. 반면에 캡루프 페어링이 장착된 경우(b) 차체 상부에서 발생하는 유동 박리현상이 완화되어 유선형의 공기 흐름이 나타났다. 이것으로부터 차체 상단부에서 발생한 압력저항이 감소되어짐을 가시적으로 확인하였다.

보트 테일을 장착하지 않은 모델의 경우(c) 차량 후미부의 급격한 형상 변화로 인하여 차체 후방에 낮은 압력값을 가지는 큰 규모(large-scale)의 와류가 형성되어 공기 저항이 크게 발생되어짐을 확인하였다. 보트 테일을 장착한 경우(d)에는 보트 테일을 따라 흐르는 유동이 유동박리를 늦추거나 후류 영역을 감소시켜 공기저항을 저감시키는 것을 가시적으로 확인하였다.



Fig. 8. Visualized flow around the cab-roof fairing and boat tail of the 5ton truck model.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라에서 가장 많이 운행되고 있는 5톤 트럭의 항력을 저감시키기 위하여 기본 차체에 다양한 형상의 사이드 스커트와 보트 테일, 캡루프 페어링을 장착하고 이들의 항력감소 효과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 부착물이 장착되지 않은 기본 모델의 항력계수 0.701로 기존 연구결과와 유사하였다.
- 2) 표준형 사이드 스커트를 장착한 경우 항력 계수 저감 효과는 4.92%이며, 꺾인 플랩(angled flap)을 가진 경우 들림각(δ)에 따라 항력계수가 변화하였으며 $\delta_1 = 15^\circ$, $\delta_2 = 0^\circ$, $\delta_3 = 15^\circ$ 인 조건에서 5.7%의 항력계수 저감 효과를 보였다. 접이식 사이드 스커트의 경우 접힘 각도 θ 의 효과는 크지 않았으며, 약 5%의 항력계수 저감효과를 보였다.
- 3) 보트 테일의 경우 길이 보다는 각도에 큰 영향을 받으며 $\omega = 80^\circ$ 일 때 4.24%의 항력계수 저감효과를 보였다. 추가적으로 차체 후미 상단부 단차를 막아주는 장치와 하부 유동을 제어하는 스포일러 형상의 장치를 추가적으로 장착한 경우 총 7.16%의 항력계수 저감 효과를 얻었다.
- 4) 각각의 유동제어용 부착물들을 조합적으로 적용해본 결과 꺾인 플랩 사이드 스커트의 경우 다른 장치들이 서로 간섭하지 않고 독립적으로 항력저감 효과를 발휘하였다. 반면에 접이식 사이드 스커트의 경우 보트 테일과 함께 작용시 2.1%의 추가적인 항력감소효과가 있어 기본 모델 대비 최대 36.8%의 항력 저감 효과를 얻을 수 있었다.
- 5) 유동가시화 실험을 통해 차체 모형 주위의 유동구조를 관찰함으로써 공기저항의 발생 원인과 함께 부착물들의 항력저감 효과를 정성적으로 분석 하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업 중 국토교통과학기술진흥원 '도로화물 운송 효율화를 위한 트레일러 경량화, 공기저항저감 및 운송용기 최적화 기술개발 연구단'의 1차년도 연구의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

- 1) Leuschen, J. and Kevin R. Cooper., 2006, "Full-scale wind tunnel tests of production and prototype, second-generation aerodynamic drag reducing devices for tractor-trailers", SAE Technical Paper.
- 2) Ortega, J., Salari, K., Brown, A., Schoon, R., 2013, "Aerodynamic drag reduction of class 8 heavy vehicles: a full-scale wind tunnel study" LLNL-TR-628153.
- 3) Choi, H., Lee, Lee, J., Park H., 2014, "Aerodynamic of heavy vehicles" Annu. Rev. Fluid Mech., Vol 46, pp.441-68.
- 4) McCallen, R., Couch, R. et al., 1999, "Progress in reducing aerodynamic drag for higher efficiency of heavy duty trucks", SAE Paper, Vol. 1, pp.3-14.
- 5) Choi, J.H and Lee, S.J, 1996, "Experimental study on drag reduction of ground vehicle using a rear-spoiler", KSAE, Vol.4, No.3, pp.31~39.
- 6) Cooper, K. R., "Truck aerodynamics reborn-lessons from the past", 2003, SAE Technical Paper, No. 2003-01-3376.
- 7) Malviya, V., Mishra, R., and Fieldhouse J. D., 2009, "CFD investigation of a novel fuel-saving device for articulated tractor-trailer combinations", Eng. Appl. Comput. Fluid Mech., Vol. 3, pp.587-607.
- 8) Kim, C.H, 2006, "An effect of roof-fairing and deflector system on the reduction of aerodynamic drag of a heavy-duty truck", Trans. KSAE, Vol.14. No.2, pp.194-201
- 9) West, G. S. and Apelt, C.J., 1982, "The effects of tunnel blockage and aspect ratio on the mean flow past a circular cylinder with Reynolds numbers", J. Fluid Mech, Vol.114, pp.361-377.