

화물트럭 형상 변화에 따른 공력특성에 관한 수치해석적 연구

지정선^{1*}, 신보창¹, 우대천¹

¹부산대학교 기계공학과

본 연구에서는 교육 및 연구를 위한 CFD 해석 프로그램인 EDISON CFD 프로그램을 이용하여 화물 트럭의 후면부 형상변화에 따른 공력특성을 분석해보았다. 먼저 추가적인 부착물을 장착하지 않은 기본적인 형상의 화물트럭의 공력특성을 확인 후, 후면부에 여러 형상의 Boat tail(보트 테일)과 전면부에 Cap-roof fairing(캡루프 페어링)이 부착된 형상을 해석하여 트럭이 받는 항력 감소를 통해 최적형상을 찾아가는 연구를 수행하였다. Cap-roof fairing이 부착된 형상에서 15°의 특성길이가 0.3인 Boat tail에서 가장 좋은 항력 감소 효과를 얻을 수 있었다. Cap-roof fairing의 경우 6%의 항력 계수 감소를 보였고 Boat tail에서 20%의 항력 계수 감소 효과를 관찰할 수 있었다. Boat tail의 각도와 길이를 변수로 하여 여러 해석을 진행한 결과 최적화된 형상을 선정할 수 있었다.

Key Words : CFD(전산유체역학), Boat tail(보트 테일), Cap-roof fairing(캡-루프 페어링), Drag force(항력), Aerodynamics(공력 특성)

1. 서 론

여러 가지 물류의 흐름에 있어 트럭은 가장 보편적인 화물 운송 수단이며, 우리나라 외에도 세계 여러 국가들은 온실 가스 감축 및 유튜브 절감을 위한 연비 개선에 많은 노력을 기울이고 있다.

연비 향상을 위한 노력은 승용차에서는 쉽게 찾아볼 수 있으나 화물트럭과 같은 대형 차량에 대해서는 아직 그 시도가 미미한 편이다. 차체의 변형이나 내연기관의 효율을 증가시키는 기계적인 방법은 혁신적인 변화 없이는 큰 효과를 보기 어려우나 외부 형상 변화를 통해 유동의 흐름에 변화를 주어 트럭에 가해지는 공기저항을 쉽게 낮출 수 있음이 기존 연구에 의해 입증되고 있다. 외부 형상의 변화란 여러 종류의 부착물을 통해 트럭 외부의 유동에 변화를 주는 것을 말한다. 현재 화물트럭에서 사용하는 부착물로는 캡루프 페어링(Cap-roof fairing), 보트 테일(Boat tail)등이 있다. 이 중 캡루프 페어링(Cap-roof fairing)은 트럭의 상부에 설치되며 화물 컨테이너와 운전자가 탑승하는 트레일러 사이의 높이 차이를 줄이고 곡선 형상을 통해 공기 저항을 줄이는 역할을 하는데, 이미 대부분의 상용트럭에서 기본적인 사양이 되었다. 그리고 보트 테일(Boat tail)은 화물 컨테이너의 가장 뒤 쪽에 설치되어 공기저항을 감소시키는 역할을 하는데 이는 상대적으로 추가적인 연구가 필요한 부분으로 보인다.

기존의 수행된 많은 연구들은 주로 풍동 실험실에서 트럭의 축소 모델을 제작 후 측정센서를 통해 직접 항력계수의 변화를 측정하고 효율적인 형상에 대해 정리한 경우가 많았

다. 이는 실제로 트럭을 동원하여 실험을 진행하기는 재정적, 환경적 어려움이 동반되기 때문이다. 전산유체역학(CFD)를 통한 해석은 이와 같은 어려움을 극복할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 edison 프로그램을 이용하여 트럭 형상의 변화에 따른 공역학적 특성을 분석하고 항력 계수를 산정하여 트럭의 연비를 향상시킬 수 있는 모델을 선정하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델 선정 및 해석 기법

본 연구에서는 보편적인 화물 트럭을 기본 모델로 설정하고 형상에 여러 가지 변화를 주어 각 변화에 따라 나타나는 공력특성을 비교하는 해석을 진행하였다. Cap-roof fairing의 유무와 Boat tail의 각도, 길이에 따른 각각의 공력특성과 항력 계수를 산정하는 것을 목표로 하였다. edison에서 제공하는 프로그램이 해석에 대하여 Reynolds값을 취하고 특성 길이를 1로 두기 때문에 형상에 대해 트럭의 길이를 무차원화 시켜 세로 1, 가로3.5로 설정하였다. 2차원 해석의 경우 트럭 하부로 지나가는 유동을 잡아낼 수 없기 때문에 바퀴 형상을 제거하고 하부의 공간만큼 벽면에서 거리를 두었다. 트럭의 기본 모델과 Cap-roof fairing을 적용한 모델, boat tail를 적용한 모델의 형상은 아래와 같다.



Fig. 1 기본 형상



Fig. 2 Cap-roof fairing 적용 형상



Fig. 3 Boat tail 적용 형상

트럭 형상을 기반으로 하여 계산한 Re수는 2.4×10^6 으로 마하수 0.1, 시속 122.4km/h에 해당한다. Re값이 충분히 크기 때문에 풍속에 관한 영향은 미미하다고 가정하고 본 연구에서의 해석은 마하수 0.1로 제한한다. EDISON_CFD에서 제공하는 정렬격자 기반 2차원 압축성 유동 범용해석 SW(2D_Comp_P)를 이용하여 정상상태의 압축성 난류 유동 해석을 하였다. 2D_Comp_P SW는 공간차분기법으로 ROE, RoeM, AUSM+등을 채택하고 있으며 시간차분기법으로는 Explicit Euler, 3rd-order TVD Runge-Kutta, LU-SGS등을 채택하고 있다. 해석자의 지배방정식으로 Reynolds-Averaged Navier Stokes(RANS)를 사용하고 난류 모델은 Menter's k- ω Shear Stress Transport이다.

본 연구에서 계산 기법으로 AUSM+을 제한자로 Van Leer를 채택하고 충분한 수렴과 해석의 신뢰성 있는 데이터를 확보를 위하여 100000회 반복 계산을 수행하고, 허용 오차를 0.00001로 설정하여 해석을 진행하였다.

2.2 격자 형성 및 경계 조건

격자는 EDISON_CFD에서 제공하는 e-MEGA 격자 생성 프로그램을 이용하여 정렬격자를 생성하였다. 화물트럭 모델은 국내에서 보편적으로 볼 수 있는 5톤 화물트럭을 기본으로 하여 모델링을 진행하였다. 벽면에서의 경계조건을 원활히 수행하기 위해 격자 블록을 14개로 나누었고 화물트럭과 유동장의 경계에는 Viscous Adiabatic Wall을 적용하고 유동장의 입구와 출구에는 각각 Subsonic Inlet과 Subsonic Outlet을 적용하였다. 유동장의 위쪽은 Far-Field, 아래쪽은 Viscous Adiabatic Wall을 주었다. 계산속도와 해의 정확성에 대해 균형을 맞추기 위해 유동장의 크기는 무차원화 된 값으로 가로 21, 세로 5로 설정하였으며 난류 유동의 점성 효과를 자세히 모사하기 위해 벽면에서의 격자 간격은 0.0001로 설정하였다.

격자 모델에 대해서는 트럭의 각 형상마다 격자를 새로 구성하였다. Boat tail의 각도와 형상에 따라 9가지 케이스의 격자 모델과 트럭 상부 Cap-roof fairing의 유무에 따른 케이스를 생성하였다. 생성된 격자를 바탕으로 해석을 진행하여 항력 계수 변화를 관찰하고, 항력이 최소가 되려면 어떤 형상이 적합한지 연구를 진행하였다.

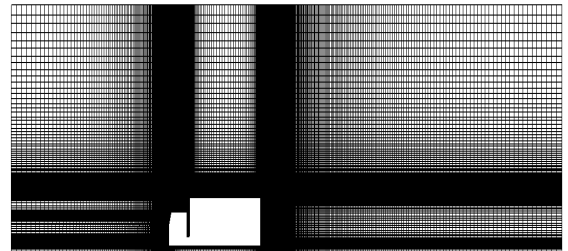


Fig. 4 격자 형태

3. 결 과

화물 트럭의 형상 변화로 나타나는 공력특성을 비교하고 분석하였다. 기본형상, Cap-roof fairing이 부착된 형상, Boat tail이 부착된 형상 등 크게 3가지로 나누어진 트럭 형상에서 유동은 각각의 특징을 가지고 있었는데 본 연구에서 관심 있게 관찰한 내용은 트럭 주변에서의 항력계수 변화와 유동의 성질을 설명해 주는 속도 및 난류 운동에너지 분포이다.

3.1 상용프로그램과의 결과 비교

많은 케이스에 대한 해석에 앞서 기본 트럭 모델에 대해 e-MEGA로 제작한 격자 파일을 에디슨 프로그램과 상용 프로그램인 fluent를 이용해 같은 조건하에서 결과 값을 비교 분석하였다.

해석은 입구 속도 122.4km/h인 조건 아래서 수행하였으며 결과는 다음과 같이 나타났다.

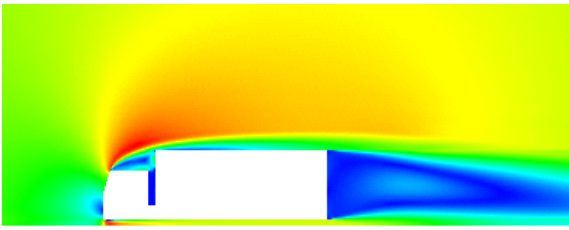


Fig. 5. 기본 형상에서의 속도 contour (Edison)

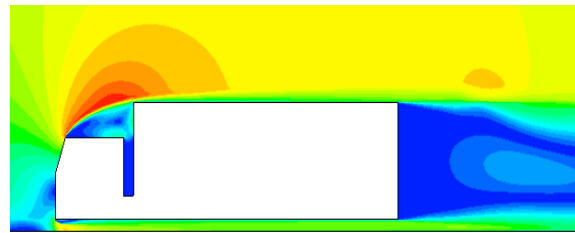


Fig. 6 기본 형상에서의 속도 contour (Fluent)



Fig. 7. 난류 운동에너지 contour (Edison)



Fig. 8 난류 운동에너지 contour (Fluent)

계산의 수렴 속도 면에서 fluent가 좀 더 빠른 경향을 보였으나 최종적으로 얻어낸 속도 및 난류 운동에너지 contour와 항력계수는 큰 차이를 보이지 않았다. edison 프로그램을 이용한 해석 데이터와 설정 조건들이 연구를 진행하는데 있어 신뢰성이 있다고 판단되어 같은 조건하에 다른 형상에 대한 해

석을 진행하였다.

3.1 항력 계수 비교

Boat tail은 트럭과 이루는 각도 15°, 30°, 45°에서의 특성길이 0.1, 0.2, 0.3에 대한 9가지 케이스로 분류하여 해석을 진행하였다.

우선 15°의 경우 항력 분포는 다음과 같이 나타났다.

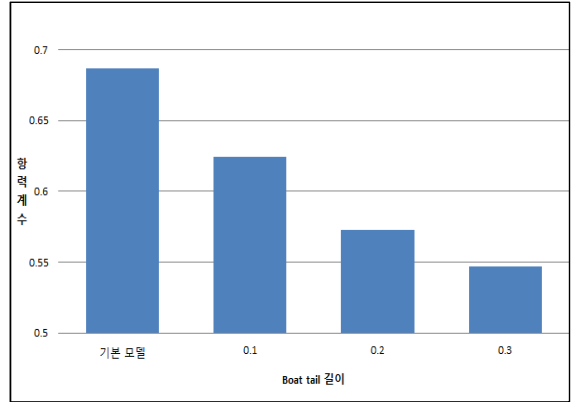


Fig. 9 15°조건 Boat tail 길이에 따른 항력계수

기본 형상의 경우 $C_d=0.687$ 로 나타났고 Boat tail의 경사각이 15°인 경우에는 특성길이에 따라 또 다른 항력계수 값을 도출할 수 있었다. 특성길이가 0.1, 0.2, 0.3인 형상에서의 C_d 값은 각각 0.624, 0.573, 0.547로써 Boat tail의 길이가 길수록 항력계수가 떨어지는 결과를 보였다. 이는 Boat tail이 유동을 효과적으로 넘겨 난류의 세기가 약화될 것이라고 유추해 볼 수 있는데, 다음 절에서 contour를 비교해 보며 분석해 볼 것이다.

Boat tail의 각도가 30°인 지점에서의 항력 분포는 다음과 같이 나타났다.

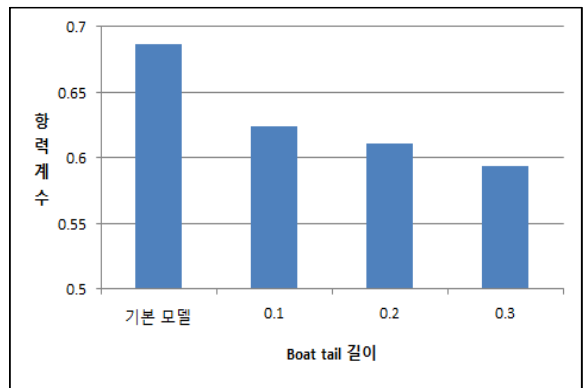


Fig. 10 30°조건 Boat tail 길이에 따른 항력계수

특성길이가 0.1, 0.2, 0.3인 형상에서의 Cd값은 각각 0.624, 0.611, 0.594이다. 0.3의 특성길이에서 가장 작은 값을 얻을 수 있었으나 전반적으로 15°에서의 결과보다 높은 값이 도출되었다.

Boat tail의 각도가 45°인 지점에서의 항력 분포는 다음과 같다.

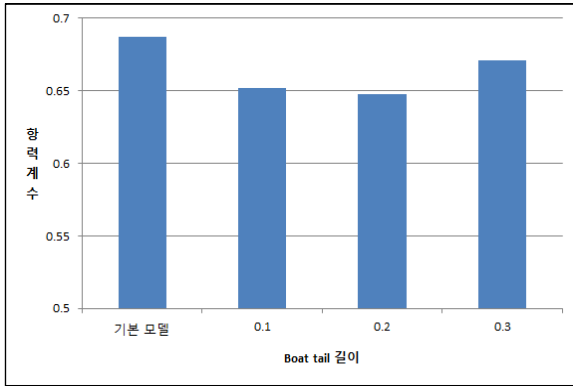


Fig. 11 30°조건 Boat tail 길이에 따른 항력계수

마지막으로 Cab-roof fairing(상부 형상)이 적용된 형상에서의 항력과 모든 해석 결과 값을 정리한 그래프는 다음과 같다.

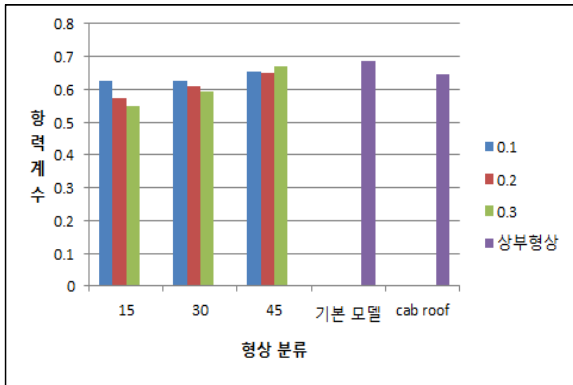


Fig. 12 형상별 항력계수 해석 결과

Cab-roof fairing 적용 시 Cd값은 0.646으로 이는 기본 모델의 항력계수 값보다 작은 값으로 Cab-roof fairing과 Boat tail 함께 적용한다면 더 큰 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

3.2 유동 형태 분석

3.1에서는 Cab-roof fairing과 Boat tail을 적용한 차량이 기본 모델보다 항력이 감소하는 정도를 정량적으로 파악해 보았다. 이 절에서는 유동의 contour와 유선을 관찰하여 항력이

감소하게 하는 요소에 대해 고찰한다.

아래는 기본 형상, Boat tail, Cab-roof fairing을 적용한 모델들의 속도 구배이다.

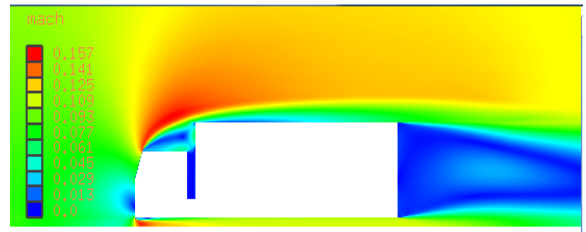


Fig. 13 기본형상의 속도 contour

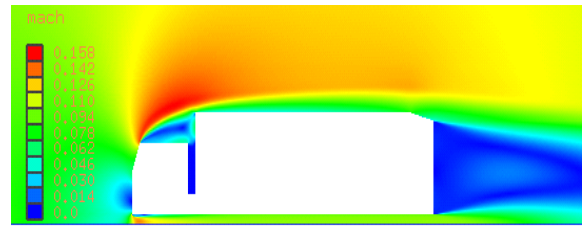


Fig. 14 Boat tail이 부착된 형상의 속도 contour

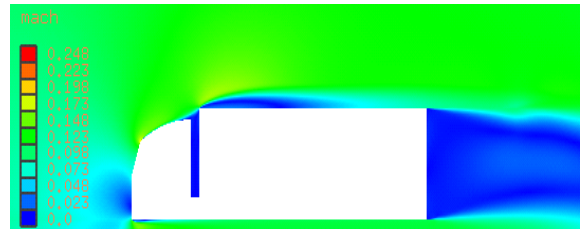


Fig. 15 Cap-roof fairing이 부착된 형상의 속도 contour

기본 형상이 트럭 후면에서의 실속이 크게 유발됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 요소는 압력차에 의해 발발하는 것으로 보이며 다른 모델에서 기본 모델보다 작은 항력계수를 관찰할 수 있는 원인이 바로 작은 압력차였음을 알 수 있다.

아래는 기본 형상, Boat tail, cab-roof fairing 적용한 모델들의 난류 운동 에너지 구배이다.



Fig. 16 기본형상의 난류 운동에너지 contour

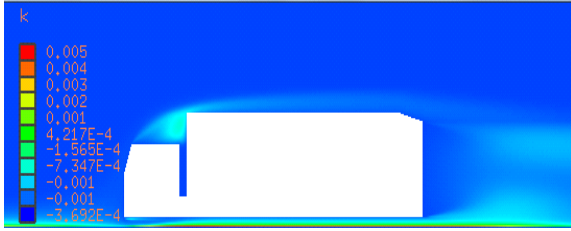


Fig. 17 Boat tail이 부착된 형상 난류 운동에너지 contour

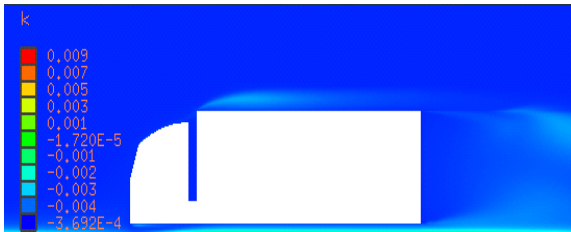


Fig. 18 Cap-roof fairing이 부착된 형상 난류 운동에너지 contour

세기에서는 큰 차이를 관찰할 수 없었으나 Cab-roof fairing 모델에서 기존 모델들이 가던 트럭 상부에서의 유동이 안정되게 바뀌었음을 확인할 수 있다.

아래는 기본 형상, Boat tail, Cab-roof fairing 적용한 모델들의 유선이다.

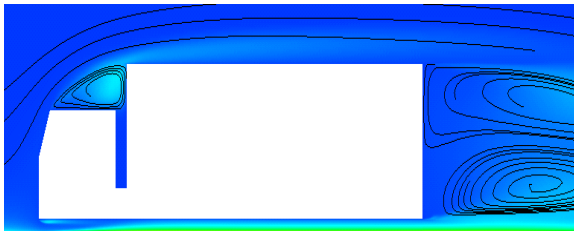


Fig. 19 기본형상의 유선 contour

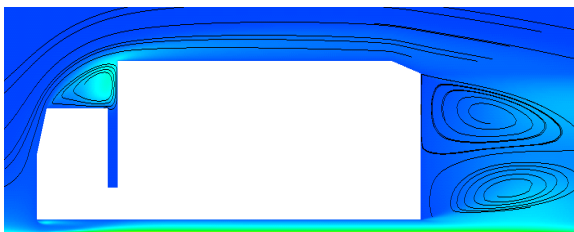


Fig. 20 Boat tail이 부착된 형상 유선 contour

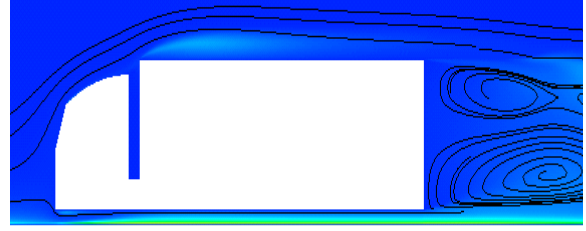


Fig. 21 Cap-roof fairing이 부착된 형상 유선 contour

기본 형상의 경우 트럭 상부와 후면에서 유동 흐름이 불규칙하게 일어나는 것을 볼 수 있었으며 그 길이도 가장 길다. Boat tail이 부착된 경우 후면에서 일어나는 난류의 크기를 작게 만들어 주어 후면에서 발생하는 난류의 크기를 감소시켰으며, Cab-roof fairing이 부착된 경우 트럭 상부에서 발생하는 난류를 제거하여 유동의 흐름을 개선시켰음을 시각적으로 확인할 수 있다. 트럭 전면부 형상을 좀 더 유연한 곡선으로 변경할 경우 더 낮은 값의 항력계수를 얻을 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 EDISON_CFD를 활용하여 화물 트럭의 공력 특성 및 외부 유동 현상을 비교 분석하였다. 외부 유동 현상을 보여주는 contour를 통해 형상에 따른 화물 트럭 후류에서의 공기 유동을 확인할 수 있었고 계산된 항력계수를 비교하여 연비 절감을 위한 트럭 형상을 선정할 수 있었다. 해석을 통해 얻어낸 결과로 도출한 결론은 다음과 같다.

1. cab-roof fairing 적용을 통해 6.0%의 항력 감소 효과를 볼 수 있었다. 이는 트럭과 트레일러 사이 흐르는 유동 흐름에 저항을 줄여준 결과로 유선에서 볼 수 있듯이 유동에 정체된 부분이 없기 때문에 트럭 상부에서의 압력 변화가 작아지기 때문이다.
2. Boat tail 부착시 15°의 특성길이 0.3의 형상에서 가장 낮은 항력 계수를 얻을 수 있었다. 20%의 항력 저하 효과가 나타났는데, 해석한 추세로 보았을 때 10°~30°사이의 각도에서 다양한 특성길이의 추가적인 해석을 통해 더 나은 형상을 확보할 수 있을 것이라 기대한다.
3. 트럭 하부로 지나가는 유동이나 트럭과 트레일러 사이의 유동 상태를 판별하는데 2D가 가진 한계점이 보인다. 트럭의 백미러와 같이 실제로 유동에 영향을 줄 수 있는 요소가 많았기 때문에 이런 부분은 3D해석을 통한 보완이 필요한 것으로 보인다.

edison 프로그램의 경우 상용 프로그램인 fluent과 비교하였을 때 수렴시간에 대한 단점은 존재하나 결과적인 측면에서 큰 차이를 보이지 않아 신뢰성 있는 해석 결과를 얻을 수 있다. 격자 생성 시 geometry 변경에 따라 space를 매 번 수정해야 하는 점은 단점으로 보인다. 또한 형상 변경에 있어서 곡선 형상에 대한 모델링에 대한 추가적인 기능을 확보한다면 더 유용하게 사용될 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016M3C1A6937383)

References

- [1] 2015년, 이의재, 황배근, 김정재, 이상준 “유동제어용 부착물을 이용한 5톤 화물차의 항력 감소에 관한 실험적 연구”, 한국가시화정보학회
- [2] 2014, Choi, H., Lee, Lee, J, Park H., “Aerodynamic of heavy vehicles“Annu. Rev Fluid Mech., Vol.46, pp. 441-68
- [3] 2006, Leuschen, J. and Kevin R. Cooper., “Full-scale wind tunnel tests of production and prototype, second-generation aerodynamic drag reducing devices for tractor-trailers“, *SAE Technical Paper*
- [4] 2003년, 임진혁, “윙렛을 부착한 승용차의 공력특성에 관한 실험적 연구”, 한국자동차공학회, Vol.7, pp-149~156
- [5] 2002년, 김철호, 차지용, “대형상용차용 루프헤어링의 공기역학적 영향에 관한 수치 해석적 연구”, 한국자동차공학회 pp.1499~1505