

항력 저감을 위한 지상차량용 페어링 형상설계

이용규¹ · 박현범^{1,†}¹군산대학교 기계공학부

Fairing Design of Commercial Vehicles for Drag Force Reduction

Yonggyu Lee¹, Hyunbum Park¹¹School of Mechanical Engineering, Kunsan National University

Abstract

A cab roof fairing is a device that reduces the drag coefficient of a commercial vehicle, by controlling the resistance of flow separation occurring in the front when the commercial vehicle travels. Commercial vehicles are designed to facilitate aerodynamic resistance that cannot be avoided from the driving direction of the vehicle, because they must structurally load containers in the rear. For this reason, it is closely related to oil costs and environmental pollutants. In this study, the 3D fairing shape was designed based on the Rankine half body theory, and the design results were verified through aerodynamic analysis.

초 록

캡 루프 페어링은 상용차가 주행 시 전면부에서 발생하는 유동 박리의 저항을 제어하여 상용차 항력 계수를 줄이는 장치이다. 상용차는 구조적으로 후방의 컨테이너를 적재해야 되기 때문에 차량의 주행방향으로부터 공기역학적 저항력을 피할 수 없게 설계되어 있다. 이러한 이유 때문에 유류비, 환경오염물질과 밀접한 연관을 가진다. 본 연구에서는 랭킨 반체 이론을 바탕으로 3D 페어링 형상을 설계하고 공력 해석을 통해 설계 결과를 검증하였다.

Key Words : Cab Roof Fairing(캡 루프 페어링), Commercial Vehicle(상용차), Aerodynamic Design(공력 설계), Rankine Half Body(랭킨 반체), Drag Coefficient(항력 계수)

1. 서 론

항공우주 분야에서 공력 설계 결과의 검증을 위해 다양한 이론을 적용하여 설계된 결과를 전산유체해석 기법을 활용하여 성능 평가를 수행한다. 본 연구에서는 이러한 항공우주 분야에 적용되는 전산유체역학 해석 기법을 육상 운송체인 상용차에 적용하는 연구를 수행하였다. 상용차는 육상화물운송의 중요한 수단으로 국내뿐만 아니라 세계적으로 널리 활용되고 있

며, 우리나라 2020년 12월 기준으로 약 63,405대 이상의 상용차가 등록, 운행되고 있다.[1] 상용차는 구조적으로 후방의 컨테이너를 적재해야하기 때문에 차량의 주행 방향으로부터 공기역학적 저항력을 피할 수 없다. 이러한 이유 때문에 유류비, 환경오염물질과 밀접한 연관을 가져서 항력 감소에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 국외의 경우, Richard M. Wood는 상용차에 작용하는 공기 저항으로 인하여 손실 되는 에너지가 상용차의 에너지 손실의 30%임을 확인하였다.[2]

국내 연구를 검토한 결과 김철호는 트랙터-트레일러에 CRF 장착하여 13.5% 항력 감소 효과를 확인하였

Received: Feb. 19, 2022 Revised: Apr. 18, 2022 Accepted: Apr. 19, 2022

† Corresponding Author

Tel: +82-63-469-4729, E-mail: swordship@kunsan.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

다.[1] 김정재 등은 상용차에 bio-inspired CRF(Cab Roof Fairing)를 장착하여 19.5% 항력 감소 효과를 확인하였다.[3] 이의재 등은 상용차에 CRF, 사이드 스킵트, 보트테일 함께 장착 하여 최대 36.8% 항력 감소 효과를 확인하였다.[4] 국내 유동 해석 분야를 살펴보면 대부분 항공우주 분야에서 공력 설계 및 성능 해석이 수행되었다. 특히 최근 개발되는 다양한 무인기의 공력 성능 해석 연구가 수행되었다.[5] 본 연구에서는 이러한 항공우주 분야에 적용되는 전산유체역학 해석 기법을 육상 운송체인 상용차에 적용하는 연구를 수행하였다. 국내의 물류 유통을 위해 육상 운송체로 많이 사용되는 상용차인 중소형 상용차 대상으로 차량 전면부에 Cab Roof Fairing(CRF)을 설치하여 상용차 전면부에서 발생하는 유동 박리에 기인한 공기저항을 제어함으로써 상용차의 공기 저항력을 대부분 저감시킨다. 따라서 본 연구에서는 CRF의 형상 변화를 통해 상용차에 걸리는 항력계수 값을 해석하여 적절한 항력 계수를 도출하였다. 공력설계에서는 다양한 설계 변수 분석을 통해 각각의 설계 변수에 따른 페어링 설계 결과를 충분히 검토하여 사용 목적에 맞도록 최적화하였다. 공력설계결과는 상용프로그램 ANSYS FLUENT를 이용하여 공력 해석을 수행하여 검증하였다.

2. 설계 개요

2.1 설계 및 적용대상

국내에 운행되는 상용차 항력감소 연구를 확인한 결과 대형 상용차에 대한 연구가 대부분이고, 중소형 상용차에 대한 연구는 미흡하였다. 그래서 본 연구에서는 중소형 상용차 캡 루프 페어링에 대한 항력감소에 대한 연구를 수행하였다. Table 1은 국내의 차량 회사인 'H'사의 마티티 와이드 6.6 냉동 탑차의 제원이다. 본 연구에서 페어링 설계 요구조건 및 제원은 Table 2와 같다. 항력계수 목표는 국내 연구를 검토한 결과 상용차에 페어링 장착 시 15~19% 항력감소 효과를 확인 하였다. 그래서 본 연구에서는 캡 루프 페어링 장착 시 20% 감소로 목표를 두었다. 페어링 운용 범위는 상용차가 고속도로 주행 시 평균 속도인 80km/h로 설정하였다.[6]

Table 1 The Vehicle Specification

Overall Length(a)		6,765mm
Overall Width(b)		2,230mm
Overall Height(c)		3,180mm
Container Size	Length(d)	5,100mm
	Width(e)	2,280mm
	Height(f)	2,200mm
Wheel base(g)		3,850mm
Cab Roof Size	Length(h)	1,350mm
	Width(i)	1,810mm
	Height(j)	2,310mm

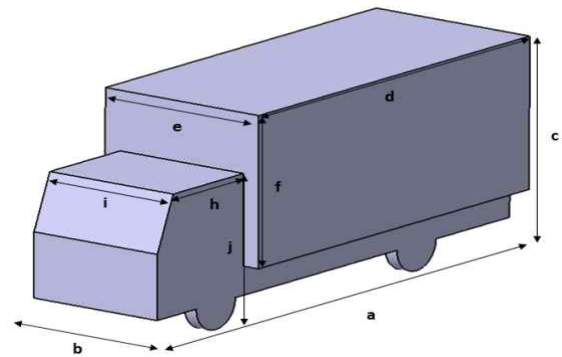


Fig. 1 The Vehicle 3D Specification

Table 2 System Specification

Type	Fairing Shape
Target Drag Coefficient reduce	20%
Scope of Operation	Average Velocity:80km/h
Cab Roof Fairing Size	Length : 1,350mm Width : 1,810mm Height : 870mm

2.2 설계 및 해석절차

캡 루프 페어링의 길이, 높이, 폭의 제한은 Cab Roof Size 을 대상으로 제한된다. 그리고 캡루프 페어링 공력 형상은 랭킨반체 이론을 통해 설계하였다. 설계한 형상을 공력 해석을 통해 성능을 검토한 후 설계 결과를 개선하고 확정하였다. Fig. 1은 이러한 설계 절차를 보여준다.

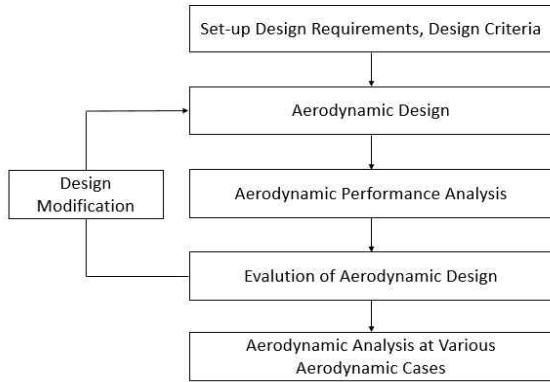


Fig. 2 Flow of Aerodynamic Design

3. 공력설계 및 성능 해석

3.1 공력설계 및 해석 이론

본 연구에서의 페어링 공력 설계 핵심은 페어링 장착 시 상용차 전체의 항력을 감소시키는 것이다. 페어링 형상 설계는 랭킨반체이론을 적용하여 공력 설계를 수행하였다.

3.2 랭킨반체이론

랭킨반체이론이란 유체 흐름의 특징으로 균일한 흐름과 원점에서 발생하는 소스 유동이 더해져 랭킨반체 흐름을 생성하게 된다. Fig. 3은 소스와 균일유동의 중첩을 의미하고, Fig. 4는 반체를 형성한 경우를 보여주고 있다.

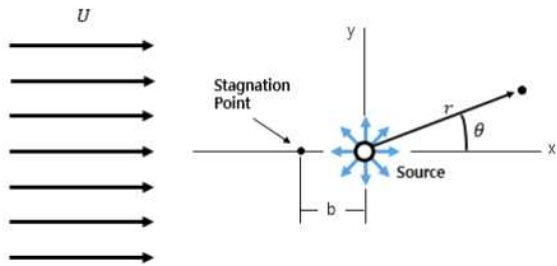


Fig. 3 The Flow Around The Half Body[7]

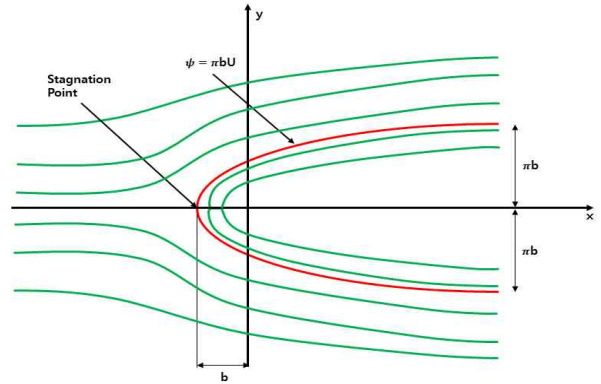


Fig. 4 Rankine Half Body[7]

균일유동과 소스의 중첩에 의해 그 결과의 유동함수를 고려하면 아래 식 (1)과 같다.

$$u_{uniform} + \psi_{source} = \psi = r \sin \theta + \frac{m}{2\pi} \theta \quad (1)$$

식(1)에서 는 유동함수이고, 는 속도이다.

$$b = \frac{m}{2\pi U} \quad (2)$$

소스와 균일 유동이 서로 상쇄되어 속도가 0이 되는 정체점이 형성된다. 식 (2)는 소스 유동만 고려했을 때 값이다.

$$r = \frac{b(\pi - \theta)}{\sin \theta} \quad (3)$$

정체점에서 유동함수의 값은 $r=b$ 이고 $\theta=\pi$ 에서의 ψ 를 구하면 되므로 r 에 관한 식으로 변환시키면 다음 식 (3)과 같은 식으로 얻는다.

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y} = U \cos \theta + \frac{m}{2\pi r} \quad (4)$$

식 (4)는 y 에 대한 편미분한 값인 카테시안 u 속도벡터이다.

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = -U \sin \theta \quad (5)$$

식 (5)는 x 에 대한 편미분한 값인 카테시안 속도 벡터이다.

$$u^2 + v^2 = U^2 \left(1 + \frac{b^2}{r^2} + \frac{2b}{r} \cos\theta \right) \quad (6)$$

식 (6)에서 V 는 Bernoulli 방정식에서 사용되는 속도 값이다.

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho U^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (7)$$

위의 식은 Bernoulli 방정식이고, (1)~(5)식에서 구한 값을 통하여 압력차를 구할 수 있다. U 는 처음속도이다. 반체에서 최대 속도인 지점은 $\theta=63^\circ$ 가 되는 지점이다. 이 지점에서는 $V=1.26U$ 이다. 최저 속도와 최대 압력은 정체점인 타원의 코에서 발생한다. 랭킨반체형상은 속도가 최대인 지점에서 최대 동압이 발생하는데 이때 전압은 최소값이 나오게 된다. 그러므로 항력계수 감소효과는 커지게 된다. 그래서 본 연구에서는 랭킨 반체 형상을 통하여 페어링 설계에 접목시켰다.

3.3 고효율 페어링 공력 설계

본 연구에서의 페어링 공력 설계는 항력 감소를 만족하는 랭킨반체형상과 페어링의 높이, 길이, 폭을 결정하는 것이다.

$$x = r \cos\theta + a \quad (8)$$

위의 식에서 x 는 페어링 길이(mm), r 은 페어링 형상에서 원점부터 최대 높이 까지 거리, a 는 타원의 코에서 원점까지의 길이이다.

$$y = r \sin\theta \quad (9)$$

위의 식에서 y 는 페어링 높이(mm)이다. 식 (8), (9)를 적용하여, 형상을 결정하면 Fig. 4와 같은 랭킨반체형상이 나오게 된다.

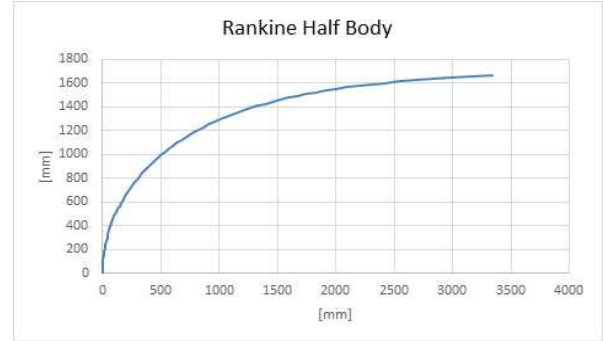


Fig. 5 Rankine Half Body

설계된 페어링의 성능 평가를 위해 적용 대상 상용차의 주요 치수를 참고하여 아래 Fig. 6와 같이 3D 모델링을 수행하였다. 상용차의 기본 형상 모델링에 랭킨반체를 적용한 2D 페어링 형상을 결합한 모델링은 아래 Fig. 7과 같다.

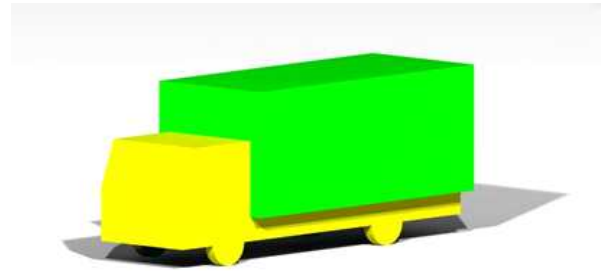


Fig. 6 Truck Shape Modeling



Fig. 7 2D Fairing & Truck Shape Modeling

3D 설계에 앞서 상용차 전면부에서 발생하는 유동박리 특성을 확인하기 위하여 트럭 형상에 대한 유동 해석을 수행하였다. 해석 결과, Fig. 8과 같이 1번 상단 모서리 부분에 압력 분포가 높은 것을 확인하였다.

반면에 2번 컨테이너 사이드 부분에서는 압력 분포 값이 주변 환경에 압력분포 값과 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 상용차 전면부에서 유동 박리가 일어나기 때문이다. Fig. 9는 측면에서 유동 박리가 일어나는 형상을 보여주고 있다. Fig. 10은 상단부에서 유동 박리가 일어나는 형상을 보여주고 있다. 본 연구에서는 해석을 통하여 상용차 전면부에 유동 방향을 예상하고, 페어링 3D 공력설계를 진행하였다. Fig. 11은 유동 흐름을 고려하여 설계한 최종 3D 페어링 형상이다. Fig. 12는 Fluent 해석의 3차원 스트림라인 형상이다.

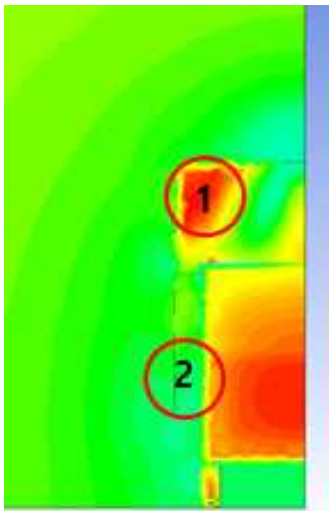


Fig. 8 Truck Front Pressure View

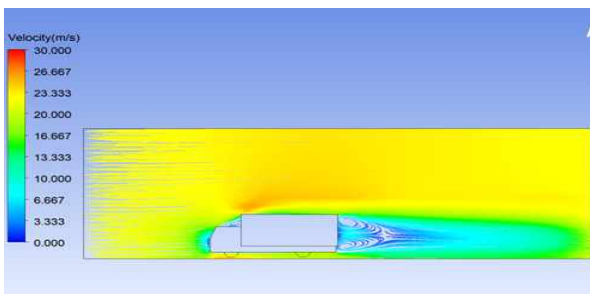


Fig. 9 Truck Side Stream View

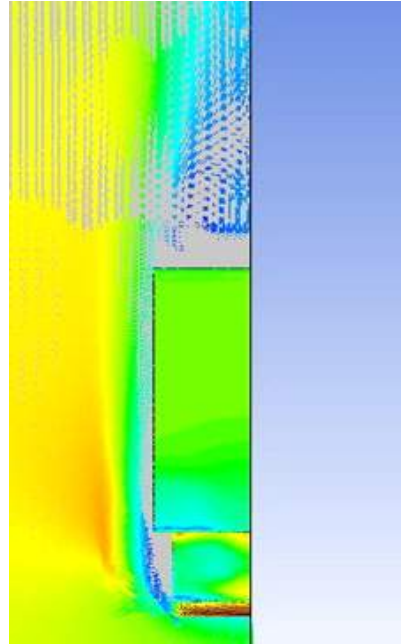


Fig. 10 Truck Top Vector View

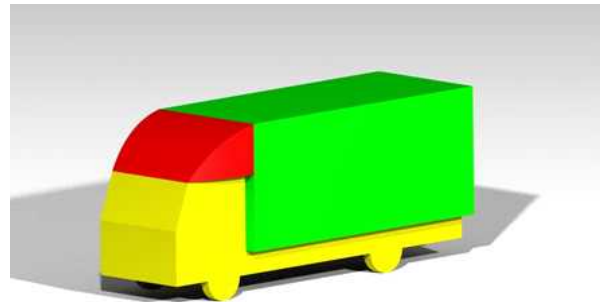


Fig. 11 3D Fairing Design

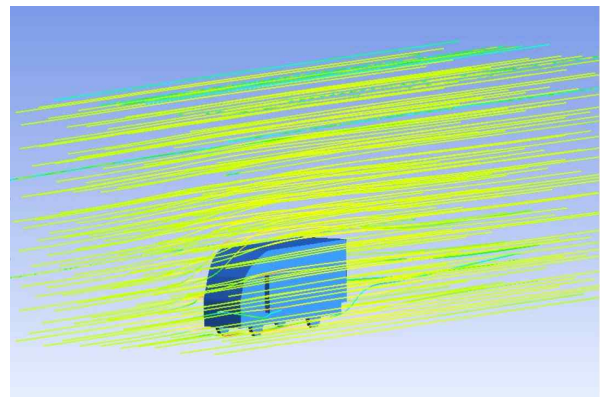


Fig. 12 Truck 3D Stream View

3.4 공력 성능 평가

3.4.1 공력해석

일반적인 항력계수의 값은 풍동 시험을 통해 항력 값을 측정한 후 아래의 식과 같이 항력계수를 구하게 된다.

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (10)$$

본 연구에서는 풍동 시험은 진행되지 않았으므로, 페어링을 장착한 상용차 항력 계수 평가를 위해 레이놀즈수를 구하고, 레이놀즈수와 형상에 따른 항력 계수를 검토하였다.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (11)$$

위의 식에서 식(11)은 레이놀즈수 식이다. ρ 는 공기의 밀도, V 는 속도, D 는 상용차의 전장, μ 는 공기의 점성계수 이다. ρ 값은 1.184kg/m^3 , V 는 상용차가 고속도로 운행 시 평균속도 80km/h , D 는 상용차의 특성 길이인 전장 전폭 전고의 길이값, μ 는 $1.85 \times 10^{-5} \text{N s/m}^2$ 이다. 계산 결과 값은 $3.2 \times 10^6 < Re < 9.6 \times 10^6$ 가 나오게 된다. 본 연구에서의 상용차의 항력 계수의 특성은 Fig. 13을 참고하여 평판과 원 사이로 확인할 수 있었다. 그러므로 상용차의 항력계수는 약 0.5~0.7값으로 예상 된다.

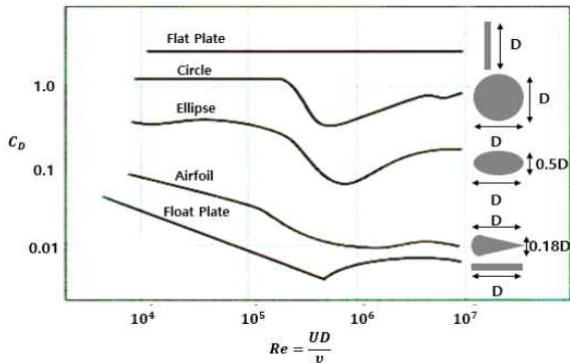


Fig. 13 Characteristics of Drag Coefficient(Function of Reynold's Number)[6]

3.4.2 CFD 해석

설계된 페어링의 정밀한 성능 평가를 위해 상용 프로그램인 Fluent를 사용하여 유동 해석을 수행하였다. 해석 범위는 상용차에서 발생하는 유동 박리가 충분히 회복될 수 있는 크기로 설정하였으며 아래 Fig. 15와 같이 상용차와 페어링 영역에는 경계층을 고려하여 헥사 격자로 구성하였으며, 나머지 영역에는 테트라 격자로 구성하였다.[8] Fig. 14의 형상은 중립축을 중심으로 차량의 절반 모델만 제시된 형상이다.

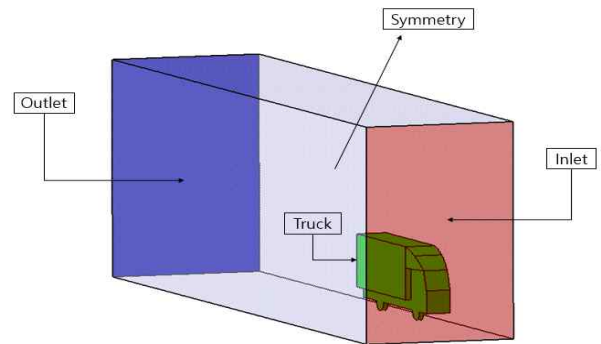


Fig. 14 Domain of The Commercial Vehicle Model

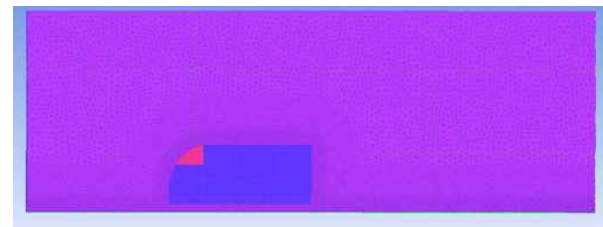


Fig. 15 A Typical Numerical Grid of The Commercial Vehicle Model with The Roof Fairing

페어링 유동 해석의 주요 경계 조건은 아래 Table 3과 같다. 유동 해석은 풍동시험과 같게 모사하였고 유체 모델은 Fluent 내 기본 공기 모델을 사용하였으며 난류 모델은 층류로부터 난류로의 천이영역에 대한 높은 신뢰성의 $k-\omega$ 모델 기반인 SST(Shear Stress Transport) Transition 모델을 적용하였다.[9]

Table 3 Fluent Boundary Conditions

Inlet	V=80km/h	
Outlet	1atm, $T_t = 25$	
Opening	Gauge Pressure = 0(Pa)	
Working Fluid	Air Ideal Gas	
Turbulence Model	Shear Stress Transport	
Heat Transfer	Total Energy Model	
Wall	Truck	No Slip Wall
	Fairing	No Slip Wall
	Bottom	No Slip Wall

3.4.3 공력 해석 결과

공력 설계 목표 항력 감소 값은 20% 이며, 상용 코드를 활용한 수치해석 결과를 검토하여 페어링이 부착되지 않은 상용차 기본 형상의 항력 계수 값은 0.523, 2D 공력 설계된 페어링의 항력 계수 값은 0.423, 3D 공력 설계된 페어링의 항력 계수 값은 0.417로 확인되었다. 기본 상용차의 형상 대비, 3D 공력 설계된 페어링 장착 시 20.1% 항력 감소를 확인할 수 있었다. Fig. 16은 랭킨반체형상의 주행속도에 따른 항력계수를 보여준다. 주행속도는 30km/h, 50km/h, 80km/h로 해석을 수행하였고 항력계수 값 0.419, 0.412, 0.417를 확인할 수 있었다. Fig. 17은 수치해석 결과 나온 스트림라인의 모습을 보여준다.

Table 4 Drag Coefficient Data

Fairing	No	2D	3D	(%)	
	Drag Coefficient			2D	3D
Fluent	0.523	0.423	0.417	19	20

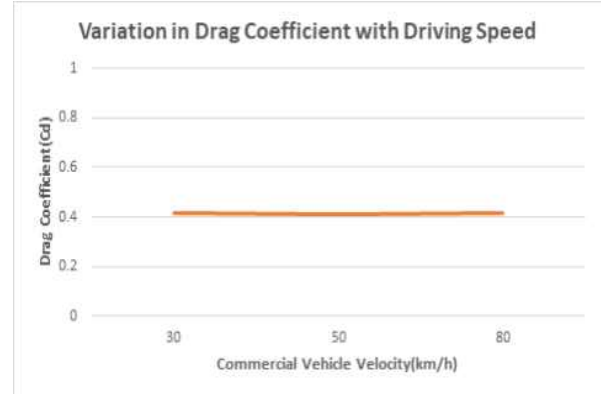


Fig. 16 Variation in Drag Coefficient with Driving Speed

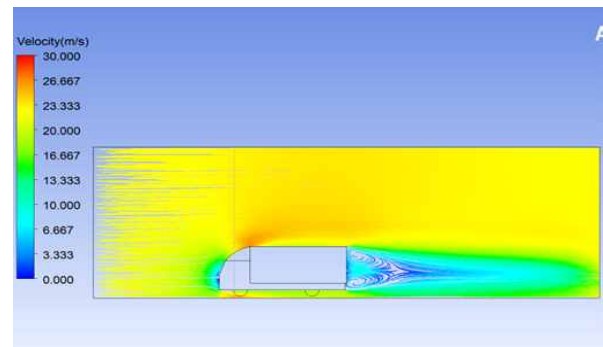


Fig. 17 Stream Line Distribution for Fluid Flow Analysis

4. 결 론

본 연구에서는 랭킨 반체에 대한 이론을 바탕으로 페어링 설계를 수행하였다. 랭킨반체에서의 변수 값을 설정하여 최적 곡선을 확보 후, 3D 페어링 형상 설계에 적용하였다. 설계된 3D 페어링의 성능 평가를 위해 3D 유동 해석을 수행하였으며 그 결과 상용차 기본 형상 대비, 페어링 장착 시 20.1% 항력 감소를 확인할 수 있었다. 본 연구 결과, 랭킨 반체를 활용한 페어링 형상은 공력 특성에 있어 충분히 효과적이라고 판단되며 차량용 페어링 외에 산업용 배관, 나아가 항공기 가스터빈 엔진 흡입구 형상 등에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 경량화를 위해 샌드위치 구조물에 유리/에폭시 복합재료를 적용하여 구조설계를 수행할 계획이다. 구조 설계 하중은 최고 운행속도와 돌풍조건을 고려한 공력하중을 분석하여 적용할 계획이다. 공력하중 값을 고려하여 구조 설계를 수행한

후 최종 구조해석을 통해 구조 안전성을 검토할 계획이다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07043553)

References

- [1] C. H. Kim, "An effect of Roof-Fairing and Deflector system on the Reduction of Aerodynamic Drag of a Heavy-Duty Truck", *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 14. No. 2, pp 194-201, 2002.
- [2] Wood. R. M. "A discussion of a heavy truck advanced aerodynamic trailer system." *Proc. of the 9th Int. Symp. Heavy Veh. Weights Dimens*, University Park, PA, 2006.
- [3] J. J. Kim, S. S. Lee, M. K. Kim, D. H. You, S. J. Lee, "Salient drag reduction of a heavy vehicle using modified cab-roof fairings." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 164, pp. 138-151, 2017.
- [4] E. J. Lee, B. G. Hwang, J. J. Kim, S. J. Lee, "Wind tunnel study on drag reduction of a 5 ton truck using additive devices", *Journal of The Korean Society of Visualization*, 13(1), 9-14, 2015.
- [5] S. R. Jeong, "Electric power small fixed wing UAV aerodynamic performance analysis", *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.13, No.1, pp.11-17, 2019.
- [6] Bruce R. M. Fluid mechanics. WILEY, New York, 2011.
- [7] <https://www.law.go.kr/>
- [8] D. Y. Sim, "Development of Induced Drag Reduction Device(IDRD) for an Aerodynamic Drag Reduction of a Heavy-duty Truck." Domestic Master's Thesis Seoul National University of Science and Technology, Seoul, 2015.
- [9] H. S. Lee, "A Study on Design of Small Vertical Axis Wind Turbin System With High Efficiency and Low Noise." Domestic Master's Thesis Chosun University, Gwangju, 2011.