

3차원 격자 종류에 따른 대형트럭 차량의 공력특성 분석

김민성*, 오대성*, 이시목*, 양종인*,# , 김현찬*,# , 김경록*,# , 이종을**, 김승훈**,
오천균**, 임지환***

*국립금오공과대학교 기계공학부, **LIG D&A, ***방위사업청

Investigation of Aerodynamic Characteristics of Heavy Truck According to the Three-Dimensional Mesh Type

Minsung Kim*, Daeseong Oh*, Simok Lee*, Jongin Yang*[#], Hyunchan Kim*[#], Gyeongrok Kim*[#],
Jongyoul Lee **, Seung Hoon Kim **, Cheonkyun Oh ** and Jihwan Lim ***

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology,

LIG Defense & Aerospace, *Defense Acquisition Program Administration

(Received 13 April 2026; received in revised form 21 April 2026; accepted 22 April 2026)

ABSTRACT

The aerodynamic performance of a heavy truck was numerically investigated under freestream velocity of 22.2m/s to analyze the difference according to the mesh types. Two mesh types were considered as polyhedral mesh and tetrahedral mesh to investigate the aerodynamic characteristics of a three-dimensional heavy truck. The pressure distribution, streamlines, velocity contours, pressure coefficient, and drag coefficient were obtained to evaluate the aerodynamic characteristics of the heavy truck. The numerical results showed that the slight differences in pressure distribution, velocity, and streamlines occurred in the flow field around the heavy truck. Nonetheless, the overall aerodynamic characteristics, including drag coefficient, were broadly similar between the two mesh types. The results confirmed that the aerodynamic characteristics of the heavy truck were similar despite the differences in mesh type.

Keywords : Heavy Truck(대형트럭), CFD(전산유체역학), Aerodynamic Characteristics(공력특성), Mesh Type(격자 종류)

1. 서 론

각진 형태의 대형트럭 차량의 경우, 차량 후방에서 와류 (vortex) 유동구조가 크게 형성되어, 유선형 구조의 차량에 비해 상대적으로 큰 항력이 형성될

수 있다. 차량에 형성되는 큰 항력은 연료 효율성을 저해하므로, 각진 형태의 대형 트럭은 상당한 연료 소모가 발생할 수 있다^[3,4]. 이에 따라, 대형트럭 차량의 공력특성을 분석하는 것은 필수적이다.

대형트럭 차량의 공력특성은 일반적으로 풍동시험과 전산유체역학(CFD)을 이용해 주로 분석 및 예측된다^[5,6]. 풍동시험의 경우 실험상 시험을 통해 공력특성을 측정 및 분석시 정확한 데이터를 얻을

Corresponding Author : gyeongrok91@kumoh.ac.kr

Tel : +82-54-478-7385

수 있으나, 일반적으로 시험장의 제한 사항들로 인하여, CFD를 활용한 공력특성 분석 연구가 수반되는 경우가 많다.

Khosravi et al.는 비정렬 사면체 격자를 통해 트럭 차량 형상 변화에 따른 항력계수 및 연료 소비율 감소를 분석하였으며, 트럭의 뒷개 날개 (cab vane) 이 차량의 항력을 20% 감소함을 확인하였다^[3]. Xu et al.는 비정렬 사면체 격자를 사용하여 압력분포와 속도분포를 기준으로 세가지 항력 감소 장치를 적용하였을 때 차량의 공력 특성을 분석하였으며, 하부 페어링(fairing)을 사용하였을 때 항력이 가장 많이 감소하였음을 확인하였다^[7]. Ghurri et al.는 실린더가 차량에 부착되었을 경우 차량에 작용하는 항력을 분석하기 위해 사면체 격자를 통해 계산을 수행하였으며, 계산 결과 D형 실린더가 차량에 부착 될 경우 가장 높은 항력 감소가 발생하는 것을 확인하였다^[8]. Galamboš et al.은 트레일러 트럭 차량을 위한 항력 감소 장치 개발을 수행하였으며, 형상 최적화를 위해 다면체(polyhedral) 격자를 이용한 CFD 분석과 실험을 통해 항력계수와 공력특성을 분석하였다^[9]. Saeedi et al.는 대형트럭 차량의 난류 유동장과 후류 특성을 해석적 방법을 통해 조사하기 위해 육면체와 다면체의 복합 격자를 활용하여 항력, 양력, 측력, 유동 분리 현상, 재순환 영역 등을 분석하였다^[10]. Phan et al.은 차량의 항력 감소를 위해 활동 유동 제어(active flow control)기술이 트럭 차량에 적용되었을 경우 항력 감소에 대해 복합 육각형 격자 기법(poly-hexcore method)을 활용하여 해석적으로 조사하였으며, 비정상 제트 장치를 사용할 경우 최대 에너지 효율 9.2%가 발생함을 확인하였다^[11]. Karthink et al.은 트럭 차량에 항력 감소 장치를 부착하였을 경우 차량에 작용하는 항력을 사면체와 육면체 격자를 활용하여 해석적으로 분석하였으며, 기존 차량 형상 대비 항력계수가 19.28% 감소하였음을 확인하였다^[12].

기존 연구들의 경우 트럭 차량의 항력 감소를 위해 유동 제어 기술 혹은 항력 감소 장치를 활용하였으며, 이때, 차량에 작용하는 항력과 감소한 항력을 CFD를 통해 분석하였다. 기존 연구들은 사면체, 육면체, 다면체, 복합 격자 등 단일 계산 격자를 활용한 차량의 공력특성 해석연구에 한정되어 있으며, 격자의 종류에 따른 공력특성 분석에 대한 연구는 거의

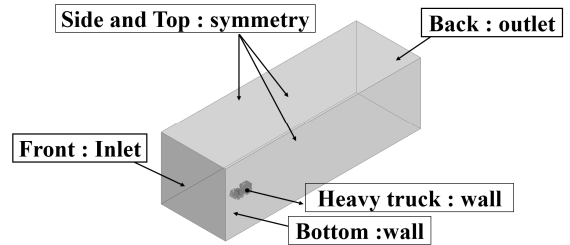


Fig. 1 Computational domain : numerical model with boundary conditions

수행되지 않았다.

CFD 계산을 수행하기 위해 구성되는 계산 격자는 결과값에 매우 중요한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 계산 격자 종류에 따른 대형 트럭차량의 공력 특성을 분석하기 위해 상용 CFD 프로그램을 활용하여 두 종류의 계산 격자를 활용하여 공력특성 분석 연구를 수행하였다.

2. 분석방법

2.1 계산모델 및 경계조건

본 연구에서는 격자 종류에 따른 차량의 공력 특성 분석을 위해 복잡한 형상으로 이루어진 차량 모델에 대하여 단순화된 더미 모델 설계를 수행하였다. Fig. 2는 계산에 사용된 해석 모델, 계산 영역 및 경계조건을 보여준다. 계산 영역의 크기는 유동장 구조를 고려하여 대상 차량 모델의 높이(H), 길이(L), 넓이(W)를 기준으로 유동 방향의 전체 길이를 10L, 넓이를 11W, 높이를 8H로 구성하였다.

계산영역은 velocity inlet, pressure outlet, symmetry, wall 경계조건을 고려하였으며, 차량 해석 모델과 바닥 면을 wall, 차량의 정면부 면을 velocity inlet, 후면부 면을 pressure outlet, 측면부 두 면과 상단부 면을 symmetry로 설정하였다. 차량이 22.2 m/s로 운용될 경우 차량에 작용하는 공력특성을 분석하기 위해 velocity inlet의 경우 유동 속도 22.2 m/s, 정압 101,325 Pa, 온도 300 K를 고려하였다. Pressure outlet의 경우 대기압과 상온을 고려하여 정압 101,325 Pa, 온도 300 K를 고려하였으며, 차량 모델과 바닥 면의 경우 점착 조건을 고려한 벽(wall) 경계조건으로 설정하였다.

2.2 계산 격자

Fig. 2는 계산 수행을 위해 구성된 계산 격자들을 보여준다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 동일한 해석 모델에 대해 다면체(polyhedral)와 사면체(tetrahedral), 형상으로 구성된 계산 격자를 보여준다. 다면체, 사면체 격자의 경우 각각 Cell 수 523,597개와 2,299,642개로 구성되었으며, 계산 격자 요소(cell)의 크기를 동일하게 설정하였다.

격자 종류에 따른 격자의 퀄리티는 Table. 1에 나타내었다. 테이블에서 볼 수 있듯이 직교성(orthogonal)의 경우 계산 격자 요소의 크기가 동일함에도 불구하고, 격자 형상의 특성으로 인해 비교적 차이가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 반면, 종횡비(aspect ratio)의 경우 두 격자 종류 모두 유사한 값으로 나타난다.

Table 1 Mesh quality comparison of computational domains

Mesh type	Polyhedral	Tetrahedral
Orthogonal	9.47×10^{-3}	5.48×10^{-8}
Aspect ratio	8.61×10^2	8.30×10^2

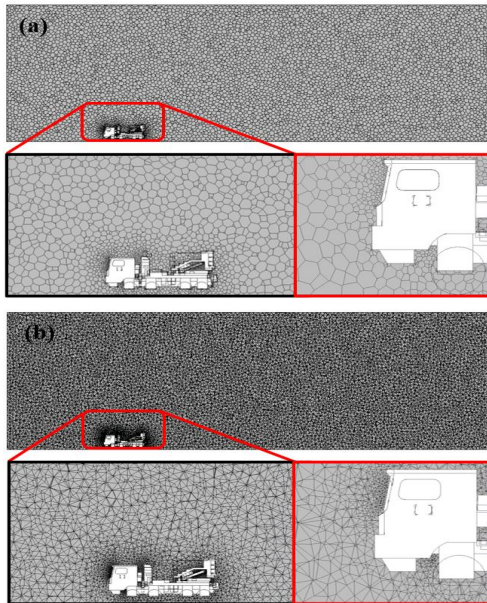


Fig. 2 Mesh domain for different node type (a) polyhedral (b) tetrahedral

2.3 해석 방법 및 지배방정식

본 연구에서는 ANSYS-Fluent version 2025R2를 사용하여 3차원 해석을 수행하였다. 해석의 정확도를 위해 double-precision 적용하였으며, 비압축성 유동조건을 고려하여, 정상상태의 pressure-based solver를 통해 계산을 수행하였다. 차량 부근에서 발생하는 난류유동을 예측하기 위해 energy model과 k- ω Shear Stress Transport(SST) 난류모델을 통해 계산을 수행하였으며, 작동유체는 밀도 1.225 kg/m^3 , 온도 300 K , 점도 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 의 공기로 고려하였다.

식 (1), (2) 그리고 (4)는 계산에서 사용된 지배 방정식으로 각각 연속 방정식(continuity equation), 운동량 방정식(momentum equation), 에너지 방정식(energy equation)을 나타낸다. 식 (3)은 정압에 난류 운동에너지와 유체 압축성 효과를 통합한 수정압력(modified pressure)의 정의식을 보여준다^[13,14]. ρ , U_i , U_j , U_k , μ_{eff} , μ_t , p , p' , T , E , λ , Pr_t , S_M , S_h , $(\tau_{ij})_{eff}$ 는 각각 밀도, 각 좌표 방향의 속도, 유효 점도(effective viscosity), 난류 점도(turbulent viscosity), 정압, 수정 압력(modified pressure), 온도, 단위질량 당 총 에너지, 유체 열전도도(thermal conductivity), 프란틀 상수(Prandtl number), 체적력(body force source), 체적 열(volumetric heat source), 유효 응력 텐서(effective viscous stress tensor)를 나타낸다.

식 (5), (6)는 k- ω Shear Stress Transport(SST) 난류 모델의 지배방정식을 보여주며, 난류 운동에너지(turbulence kinetic energy, k)와 특정 소산율(specific dissipation rate, ω)을 각각 구할 수 있다^[15]. 이때, G_k , G_ω , Γ_k , Γ_ω , Y_k , Y_ω , S_k , S_ω 는 각각 생성된 k, ω , k 유효 확산 계수(effective diffusivity), ω 유효 확산 계수, k와 ω 의 소산, 발생항(source term)을 의미한다. 본 연구에서 난류모델의 각 계수 및 상수의 경우는 해석 프로그램의 기본값을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = \\ - \frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu_{eff}(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i})] + S_M \end{aligned} \quad (2)$$

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k + \frac{2}{3}\mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_j(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + U_i (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (6)$$

3. 계산 결과

Fig. 3는 대형 차량의 정면에서 바람이 22.2m/s로 불어오는 조건에서 계산 격자 종류에 따른 유동장의 압력 분포를 보여준다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 다면체 계산 격자를 통해 계산된 유동장의 측면, 평면 압력 분포와 차량 부근에서 확대된 압력 분포를 보여준다. 측면 압력 분포의 경우 차량의 중심 면을 기준으로 나타내었으며, 평면 압력 분포의 경우 차량 바퀴로부터 1.5m 떨어진 평면을 기준으로 나타내었다.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 대형 차량의 정면부에서 압력이 증가하는 현상이 나타난다. 이후, 차량의 측면과 윗면 부근에서 압력이 감소하며, 중심부부터 후방부까지 다시 압력이 증가하는 현상이 관찰된다.

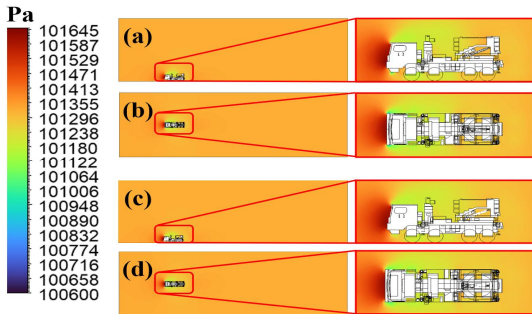


Fig. 3 Static pressure contour along the different mesh type (a) polyhedral side view; (b) polyhedral upper view; (c) tetrahedral side view; (d) tetrahedral upper view

이러한 현상은 차량의 형상적 특성으로 인해 차량의 윗면과 측면에서 경계층이 발달하여 발생한 현상으로 판단된다. Fig. 3(c)와 (d)는 각각 사면체 계산 격자를 통해 계산된 유동장의 측면, 평면 압력 분포를 보여준다. 두 압력 분포의 기준면은 다면체 압력 분포의 기준면과 동일하다. Fig. 3(a), (b)와 동일한 유동 조건 및 기준 면으로 인해 매우 유사한 압력 분포가 관찰된다.

Fig. 3(a), (b)와 (c), (d)를 비교하였을 때 사면체 계산격자의 경우 다면체 계산 격자에 비해 대형 차량의 정면부 부근에서의 압력분포가 상대적으로 낮게 분포되어 있으며, 차량의 윗면과 측면부의 압력은 상대적으로 높게 나타나는 현상이 관찰된다. 이러한 현상은 계산 격자 종류의 차이로 인해 계산 결과 값에 차이가 발생하며 나타난 현상으로 보인다.

Fig. 4는 대형 차량의 정면에서 바람이 22.2m/s로 불어오는 조건에서 계산 격자 종류에 따른 유동장의 유선을 보여준다. Fig. 4에서 차량 부근과 후류에서 복잡한 난류 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)는 각각 다면체 계산 격자를 통해 계산된 유동장의 측면, 평면 유선과 확대 그림을 보여준다. 두 유선의 기준면은 다면체 압력분포의 기준면과 동일하다.

Fig. 3(a)와 (b)확대 그림에서 볼 수 있듯이 대형 차량의 정면부에서 유동 박리가 발생하여 유동 경계층이 형성되고 차량의 윗면과 중심부에서 복잡한 난류 유동의 발생이 관찰된다. 차량 후방부의 경우

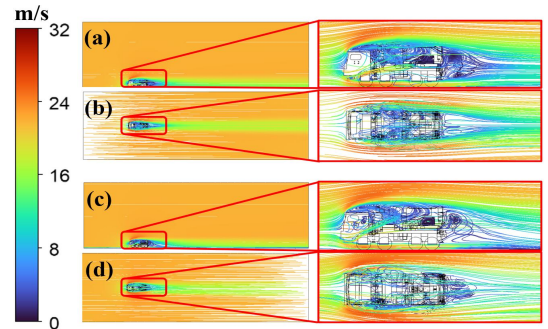


Fig. 4 Streamline along the different mesh type (a) polyhedral side view; (b) polyhedral upper view; (c) tetrahedral side view; (d) tetrahedral upper view

유동이 차량에 재부착 후 다시 유동 박리가 발생하는 현상이 나타난다. 이러한 현상으로 인해 차량의 후류에서 중심부와 같은 난류 유동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)와 (d)는 각각 사면체 계산 격자를 통해 계산된 유동장의 측면, 평면 유선과 확대 그림을 보여준다. 두 유선의 기준면은 다면체 유선의 기준면과 동일하다. 대형 정면부에서 유동 박리가 발생하며, 차량의 윗면과 중심부에서 난류 유동이 발생하는 등 동일한 유동 조건으로 인해 다면체 유선과 매우 유사한 유선이 확인된다.

Fig. 4(a), (b)와 (c), (d)를 비교할 경우, 전체적으로 유사한 유선이 확인된다. 하지만, Fig. 4(a)와 (c)를 비교하였을 때 Fig. 4(a)의 경우 Fig. 4(c)에 비해 상대적으로 차량의 중심부와 후류의 난류 유동을 조밀하게 나타내는 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 4(b), (d)를 비교할 경우 Fig. 4(d)에서 차량 중심부의 난류 유동은 희미하게 나타나지만 차량 전면 측면부에서 발생하는 난류 유동이 상대적으로 선명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 계산 격자 종류에 따른 차량 후류의 속도분포를 보여준다. 속도분포는 서로 다른 위치의 다섯 면을 통해 나타내었으며, 각 면은 차량으로부터

0.2m부터 12.2m까지 3m 간격으로 위치해있다. 그림에서 볼 수 있듯이 차량 후방부에서 매우 낮은 속도분포가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 다면체와 사면체로 구성된 계산 격자를 이용하여 계산된 후류 속도분포를 보여준다. 차량 후방부에서 매우 낮은 속도분포가 확인되며, 차량으로부터 멀어질수록 낮은 속도분포가 희미해지며 자유류 속도와 유사해지는 현상이 확인된다. 이러한 현상은 차량 후방 부에서 유동 박리, 유동 전단층 발달 등의 현상으로 인해 낮은 속도의 난류 유동이 발생하고, 차량으로부터 멀어질수록 유동 전단층과 난류 유동의 영향이 줄어들며 발생한 것으로 판단된다. Fig. 5(a)와 (b)를 비교하였을 때 Fig. 5(a)의 경우 Fig. 5(b)의 후류 속도 분포에 비해 낮은 속도의 유동 영역이 상대적으로 작으며, 차량의 중심 면에 가깝게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 데이터 수집 평면(data acquisition plane)에서 위치에 따른 압력계수를 보여주며, 위치는 차량의 길이로 나누어 무차원화된 위치로 나타내었다. 이때, 압력계수는 식 (7)과 같이 계산되었다^[6].

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho A v_\infty^2} \quad (7)$$

P , P_∞ , ρ , A , v_∞ 는 각각 정압, 자유류 정압, 자유류 밀도, 기준 면적, 자유류 속도를 의미한다. 본 연구에서 기준 면적은 대략적인 차량 정면부 단면적으로 적용하였다.

Fig. 6(a)와 (b)는 각각 다면체 계산 격자를 통해 계산된 X축 위치에 따른 압력계수와 X축, Y축 위치에 따른 압력계수를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 차량 부근에서 압력계수가 증가 및 감소하는 현상이 나타난다. X축 -2지점과 0지점 사이를 보았을 때, 0지점에 가까워질수록 압력계수가 증가하는 형태로 분포되어있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 유동이 차량에 부딪히며 유동 속도가 감소하여 발생하는 현상으로 판단된다.

X축 0지점과 2지점 사이의 경우 증가하였던 압력계수가 급격하게 감소한 형태로 분포되어 있으며, X축 2지점에 가까워질수록 다시 증가하는 현상이

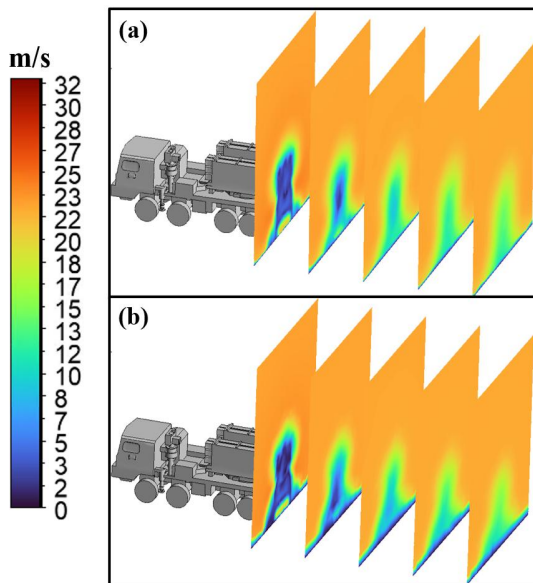


Fig. 5 Velocity contour along the different mesh type (a) polyhedral (b) tetrahedral

나타난다. 이러한 현상은 차량의 전면부에서 발생한 경계층으로 인해 차량 부근에서 압력계수가 급격하게 감소한 뒤, 차량 후방 부에 가까워질수록 경계층의 영향이 감소하며 압력계수가 증가하는 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 6(c)와 (d)는 각각 사면체 계산 격자를 통해 계산된 X축 위치에 따른 압력계수와 X축, Y축 위치에 따른 압력계수 분포를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 차량 부근에서 압력계수 분포가 증가, 감소하는 현상이 나타나며, Fig. 6(a), (b)와 상당히 유사한 분포가 관찰된다.

Fig. 6(a), (b)와 (c), (d)를 비교하였을 때, 전체적으로 매우 유사한 압력계수 분포가 관찰된다. 하지만, X축 0지점 부근에서 일부 매우 낮은 압력계수 분포의 경우 다면체 계산 격자와 사면체 계산 격자에서 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이는 격자 종류가 달라 구성된 계산 격자의 일부 요소(cell)에서 발생한 것으로 보인다.

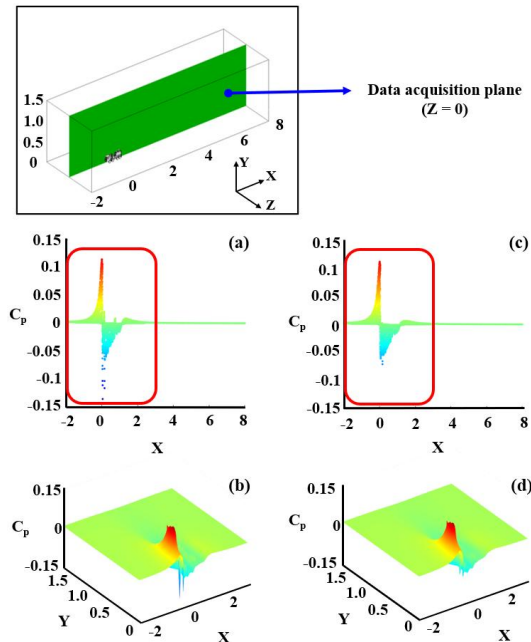


Fig. 6 C_p along the data equation plane for different mesh type (a) Polyhedral mesh 2axis graph; (b) Polyhedral mesh 3axis graph; (c) Polyhedral mesh 2axis graph; (d) Polyhedral mesh 3axis graph;

Table. 1은 계산 격자 종류에 따른 항력계수와 항력계수의 차이를 백분율로 보여준다. 항력계수는 식 (8)을 통해 계산되었다^[17]. 이때 D , ρ , A , v_∞ 는 각각 항력, 자유류 밀도, 기준 면적, 자유류 속도를 의미한다.

기준 면적은 대략적인 차량정면부 단면적으로 적용하였다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho A v_\infty^2} \quad (8)$$

Table 2 Aerodynamic characteristics along the mesh type

Mesh type	Cd
Polyhedral	0.856
Tetrahedral	0.869
Difference [%]	1.52

Table 2에서 볼 수 있듯이 다면체와 사면체로 구성된 격자로 계산된 대형 차량의 항력계수는 각각 0.856, 0.869로 사면체 계산 격자의 경우 항력계수가 상대적으로 높게 나타나는 현상이 관측된다. 이러한 현상은 사면체의 경우 차량 부근에서 발생하는 난류 유동과 압력 분포에서 발생한 차이로 인해 발생한 현상으로 판단된다. 두 종류의 격자로 계산된 항력계수에 일부 차이가 발생하였지만, 다면체 격자를 기준으로 계산하였을 때 차이 1.52%로 계산 격자 종류가 다름에도 항력 계수가 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 상용 CFD 프로그램을 사용하여 대형트럭 차량의 공력특성을 분석하였다. 단일 유동 조건에 대하여 계산을 수행하였으며, 계산 격자의 종류에 따른 공력특성을 비교 분석하였다.

다면체와 사면체 계산 격자를 활용하여 계산을 수행하였을 때, 차량 중심부, 측면, 후류 부근에서 유선, 속도분포, 압력계수에 국부적으로 근소하게 차이가 있었으나, 유동장의 압력 분포, 유선, 속도

분포, 압력계수, 항력계수가 전체적으로 매우 유사하게 나타났다. 더 나아가, 항력계수의 경우, 서로 다른 계산 격자 종류에도 불구하고 산출값이 유사하게 도출되었다.

본 연구의 결과를 통해 대형트럭 차량에 대해 동일한 유동 조건에서 해석이 수행될 경우, 서로 다른 격자 종류에도 전체적으로 유사한 공력특성이 도출됨을 확인하였다. 이러한 결과는 대형트럭 차량의 공력특성 분석 및 예측 수행 시 학술참고 자료로 적극 활용 가능할 것으로 판단된다.

5. 향후 연구 방향

본 연구에서는 상용 전산유체해석 (CFD) 프로그램으로 수행된 대형트럭 차량의 공력특성 분석만 다루고 있다. 이에따라, 향후 실험적 접근을 통한 본 CFD 해석 결과와의 비교 분석 등 후속 연구를 수행할 계획이다.

후기

이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음 (This research is performed based on the cooperation with Kumoh National Institute of Technology-LIG D&A Cooperation)

REFERENCES

1. Chowdhuty, H., Juwono, R., Zaid, M., Islam, R., Loganathan, B. and Alam, F., "An experimental study on the effect of various deflectors used for light trucks in Indian subcontinent," *Energy Procedia*, Vol. 160, pp. 34-39, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.115>
2. Patel, N., He, M., Hemida, H. and Quinn, A., "Large-Eddy Simulation of the airflow around a truck," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 195, 104017, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104017>
3. Khosravi, M., Mosaddeghi, F., Oveisi, M. and Khodayari-b, A., "Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis," *Journal of Central South University*, Vol. 22, pp. 4645-4652, 2015.
<https://doi.org/10.1007/s11771-015-3015-7>
4. Choi, K. and Cho, J., "Air Flow Analysis on Driving Truck with or without Side Pairing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 5, pp. 14-20, 2020.
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.05.014>
5. Salati, L., Schito, P. and Cheli, F., "Wind tunnel experiment on a heavy truck equipped with front-rear trailer device," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 171, pp. 101-109, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.016>
6. Cho, J. and Han, M., "Flow Analysis on the Outside of Automotive Body," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 55-60, 2010.
7. Xu, J. and Zhou, S., "Flow field analysis of trucks and a design of an additional drag reduction device," *Engineering Review*, Vol. 38, No. 1, pp. 70-78, 2018.
8. Ghurri, A., Alim, M., Adi, M. N. P., Putra, S. G. B., Matik, M. E., Suharto, S. and Anderson, R., "CFD Simulation of Aerodynamics Truck Using Cylinder as Drag Reduction Device," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 105, No. 3, pp. 166-181, 2023.
<https://doi.org/10.37934/arfmts.105.2.166181>
9. Galambos, S., Nikolic, N., Vorotovic, G., Stojic, B., Doric, J. and Feher, D., "An optimization procedure of shape and position of the aerodynamic device at the rear side of a semi-trailer truck model," *Heliyon*, Vol. 11, e41411, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41411>
10. Saeedi, M., Nyantekyi-Kwakye, B. and Asgari, E., "Energy and frequency analysis in the wake of a heavy-duty truck model using large-eddy simulation," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol. 253, 105854, 2024.
11. Phan, T., Nguyen, T. T. and Nguyen, T. H. T., "Optimization of unsteady jet control flow method

for aerodynamic drag reduction of heavy truck model,” Results in Engineering, Vol. 22, 102167, 2024.

12. Karthik, M. S., Reddy, P. S. K., Makwana, R., Dasi, S., Gamaun, F., Prakash, C. and Smitha, T. V., “Computational investigation on drag coefficient and pressure distribution of the truck with add-on,” Ain Shams Engineering Journal, Vol. 16, 103332, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103332>
13. Tao, Y., Yu, X. and Liu, B., “A New Method for Rapid Optimization Design of a Subsonic Tandem Blade,” Applied Sciences, Vol. 10, No. 24, 8802, 2020.
<https://doi.org/10.3390/app10248802>
14. Bazzi, T. and Zirak, S., “Transient conjugate heat transfer and thermomechanical numerical analysis of a Mark II gas turbine blade using CFD - FEA coupled simulations,” Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 150, pp. 18561-18586, 2025.
<https://doi.org/10.1007/s10973-025-14760-1>
15. Thakare, H. R. and Parekh, A. D., “CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 78, pp. 360-370, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.083>
16. Kassa, B. Y., Baheta, A. T. Beyene, A., “Aerodynamic performance characteristics of low Re airfoils: A parametric and multi criteria decision study,” Results in Engineering, Vol. 24, 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103174>
17. Bettle, J., Holloway, A. G. L. and Venart, J. E. S., “A computational study of the aerodynamic forces acting on a tractor-trailer vehicle on a bridge in cross-wind,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 91, pp. 573-592, 2003.
[https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00461-0](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00461-0)