

대형 상용차 코너베인 주위의 공력특성에 관한 3차원 수치해석

김 민 호(기아자동차), 정 상 원(전남 과학대학)

Three-Dimensional Numerical Study on the Aerodynamic Characteristics around Corner Vane in a Heavy-Duty Commercial Vehicle

Min-Ho Kim(Kia Motors Corp.), Sang-Won Chung(Chunnam Techno College)

ABSTRACT

The aerodynamic characteristics of large transport vehicle has become more and more important in recent vehicle design to improve driving performance in high speed cruising and raise the product value with regard to a comfortable driving condition. Hence, detailed knowledge of the flow field around truck corner vane is essential to improve fuel efficiency and reduce the dirt contamination on vehicle body surface. In this study, three-dimensional flow characteristics around corner vane attached to truck cabin were computed for the steady incompressible, and high speed viscous flow, adopting the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. In order to investigate the influence of configuration and structure of corner vane, computations were carried out for four cases at a high Reynolds number, $Re=4.1 \times 10^6$ (based on the cabin height). The global flow patterns, drag coefficient and the distributions such as velocity magnitude, turbulent kinetic energy around the corner vane were examined. As a result of this study, we could identify the flow characteristics around corner vane for the variation of corner vane length and width. Also, suggest the improved structure to reduce the dirt contamination in cabin side.

주요기술용어 : Aerodynamic Characteristics(공력특성), Dirt Contamination(먼지 오염도), Corner Vane(코너베인) Turbulent Kinetic Energy(난류 운동 에너지), Drag Coefficient(항력계수)

Nomenclature

ρ : density	τ_{ij} : stress tensor component
t : time	μ_{eff} : effective viscosity
P : pressure	μ : laminar viscosity
x_i : cartesian coordinate($i=1,2,3$)	μ_t : turbulent viscosity
u_i : i-directional velocity	$\sigma_{k,t}$: turbulent prandtl number
S_i : momentum source component	k : turbulent kinetic energy
s_{ij} : strain tensor component	ε : dissipation rate

1. 서 론

과거 십수년 동안 자동차 주위의 유동특성에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 자동차 주행 시 발생하는 유동특성 중 공기저항을 감소시키기 위한 연구들이 주를 이루고 있으며 높은 차체를 갖는 대형 상용차와 운반용 밴 차량에 대해서도 공기역학적 특성을 개선하기 위한 많은 연구들이 진행되었다.^{1,2,3,4,5,6)}

기존의 상용차에 대한 공기역학적 연구를 살펴 보면 Nishigawa 등⁷⁾은 유한차분법을 이용한 수치해석을 통하여 항력계수와 회전하는 타이어의 영향을 고려한 캐빈 하우징(cabin housing) 주위의 유동특성을 고찰하였고 Tsutomu 등⁸⁾은 밴타입 차량의 후부에 패널을 부착하여 먼지 고착에 관한 실험을 수행하였다. Olson 등⁹⁾은 캐빈형상과 요각(yaw angle) 변화에 따른 항력계수를 실험적으로 구하였으며 Cresswell 등¹⁰⁾은 외부 거울주위의 유동에 대한 연구를 수행하였다. 위와 같이 캐빈 형상과 보조장치의 부착 및 트레일러가 연결된 조합차량에 대한 연구들이 수행되었으나 캐빈 측면에 부착되는 코너베인(corner vane) 주위의 유동장에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 코너베인은 차량 모서리에서 발생하는 유동박리(flow separation)를 방지하여 공기저항을 줄이는 기능과 유독 방향을 변경하여 캐빈 측면 및 유리창의 오염을 저감하는 역할을 한다. 특히 비포장길이나 건설현장 등의 먼지가 많은 건조로를 주행하는 트럭 차체의 경우에는 타이어에 의해 발생하는 먼지가 차실내로 유입되거나 차체나 유리창에 부착되어 더럽히는 요인이 될 뿐만 아니라 운전자의 시계약화를 초래하여 차량의 안전성과도 연관되어 진다.

본 연구에서는 트럭 캐빈에 부착되는 코너베인 주위의 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. 코너베인의 부착 위치 및 구조변경에 따른 유동특성을 고찰하여 상품성 향상 및 최적 공력 설계를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 수치해석

과거의 자동차 주위의 공기역학에 대한 연구들은 실험을 통하여 유동특성을 가시화 하는 연구들이 많이 수행되었으나 소요경비와 시간이 많이

소비되는 단점이 있다. 반면 최근 컴퓨터의 발달과 더불어 전산 유체역학 기법은 소요경비와 시간을 절감할 수 있으므로 차량 개발단계시 전산 유체역학 기법을 이용한 연구들이 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 전산 유체역학 기법을 이용하여 트럭 캐빈에 부착되는 코너베인의 부착위치 및 캐빈과의 간격 등의 변화에 따른 유동특성을 고찰하였고 유동저항 측면과 더불어 코너베인 구조개선을 통하여 오염도를 저감할 수 있는 코너베인 형상결정의 기초자료를 제공하고자 한다.

2.1 지배방정식

본 연구에서는 일반좌표계에서의 지배방정식인 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며 난류모델은 RNG k-ε 모델¹³⁾을 사용하였다. 정상상태의 연속방정식과 운동량 방정식을 텐서(tensor)형태로 나타내면 다음과 같다.

- 연속 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

- 운동량 방정식

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j - \tau_{ij}) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

또한 RNG k-ε 모델의 난류 운동 에너지와 소산율에 대한 지배 방정식은 다음과 같다.

- 난류 운동 에너지

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t}(\sqrt{g} \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \mu_t (P + P_B) - \rho \epsilon - \frac{2}{3} \left(\mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho k \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

여기서 $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$, $P = 2 S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_{k,t}} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (3)$$

- 난류 운동에너지 소산율

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial t}(\sqrt{g} \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \bar{u}_j \epsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right)$$

$$- C_{\mu} \frac{\epsilon}{x} \left[\mu \left(P + C_{\epsilon 1} P_{\epsilon} \right) - \frac{2}{3} \left(\mu \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho x \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{x} - C_{\mu} \rho \epsilon \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$$

$$- \frac{C_{\mu} \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \epsilon^2}{x}$$

$$\text{여기서 } \eta = S \frac{x}{\epsilon} \quad S = (2 S_{\theta 1} S_{\theta 2})^{1/2} \quad (4)$$

위의 식 (3), (4)에 사용된 각각의 상수를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Coefficients of RNG k-ε model

C_{μ}	σ_k	σ_{ϵ}	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$
0.085	0.719	0.719	1.42	1.68
$C_{\epsilon 3}$	$C_{\epsilon 4}$	κ	η_0	β
0.0 or 1.42	-0.387	0.4	4.38	0.012

2.2 격자생성 및 해석모델

전산 해석에 있어서 많은 시간이 소요되는 과정은 계산격자의 생성절차인데 기하학적 모델 생성을 위하여 3차원 CAD(Computer Aided Design) 프로그램인 CATIA를 이용하였다. 캐빈과 코너 베인의 형상에 따른 3차원 선도와 표면 데이터를 생성한 후 전체 해석영역을 구성하였고 다시 여러 개의 부영역으로 분할하여 각각의 부영역에 대하여 육면체 격자를 생성하였다. 격자계는 비엇갈림 격자계(non-staggered mesh)를 사용하였다. 해석모델은 450,000여개의 셀(cell)로 구성하였으며 좌우 대칭이므로 차량모델의 반쪽만을 구성하였다. 모델 영역은 차량 앞쪽의 경우 차량 길이의 5배, 옆쪽으로는 차량 폭의 5배, 위쪽으로는 차량 높이의 4배, 뒤쪽으로는 모델크기의 감소를 위하여 차량 길이의 2배로 하였다. 수렴조건은 반복계산시 연속 방정식과 3개의 운동량 방정식 그리고 2개의 난류량 방정식에 대한 잔류오차를 0.1%이하로 하였으며 이완계수(relaxation factor)는 속도항과 난류량에 대해 각각 0.7, 0.4를 입력항에 대해서는 0.3으로 하였다. 점성항은 중심차분기법을 사용하였고 대류항은 일차 정확도 상류차분기법을 입력항 처리는 SIMPLE 알

고리즘을 사용하였다.¹⁴⁾

2.3 경계조건

본 연구에서 입구부의 경계조건은 차량주행속도가 60km/h(16.7m/sec), 100km/h(27.8m/sec)일 때의 유속을 적용한 경우로써 차량 높이를 기준으로 한 레이놀즈수(Reynolds number)는 각각 2.4×10^6 , 4.1×10^6 이며 출구부에서는 정압조건을 부여하였다.

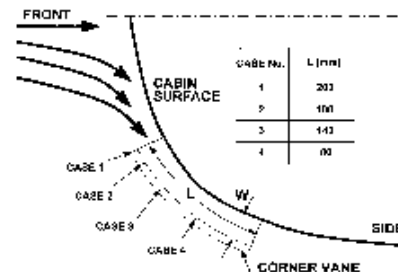


Fig.1 Configuration of corner vane

3. 해석결과 및 고찰

3.1 코너베인 길이와 폭 변화에 따른 유동특성

Fig.1에는 코너베인의 길이(L)와 코너베인과 캐빈사이의 폭(W) 변화 등에 따른 모델의 개략도를 도시하였다. 변경인자인 길이는 각각 200mm, 180mm, 140mm, 80mm로 폭은 30mm와 48mm 등으로 고려하였다. Fig.2와 Fig.3에는 길이변경에 대한 코너베인 주위의 속도와 난류 운동에너지 분포를 도시하였다. Fig.2에 도시한 바와 같이 전반적으로 코너베인 주위의 유속분포는 유동이 캐빈 모퉁이를 통과할 때 코너베인과 캐빈 사이에서 최대 유속값이 존재하였으나 CASE 4의 경우는 달리 코너베인 앞쪽 끝단에서 형성되었다. 또한 난류강도가 큰 경우 소음이 상대적으로 크게 발생하므로 속도의 난동성분의 제공에 대한 시간 평균값인 난류 운동 에너지의 분포¹⁵⁾를 Fig.3에 도시하였다. CASE 1의 경우에는 난류 운동 에너지의 최대값이 코너베인 바깥쪽면을 따라 형성되나 나머지 경우는 베인 앞쪽 끝단에서 발생하였으며 베인의 위치가 뒤쪽에 위치할수록

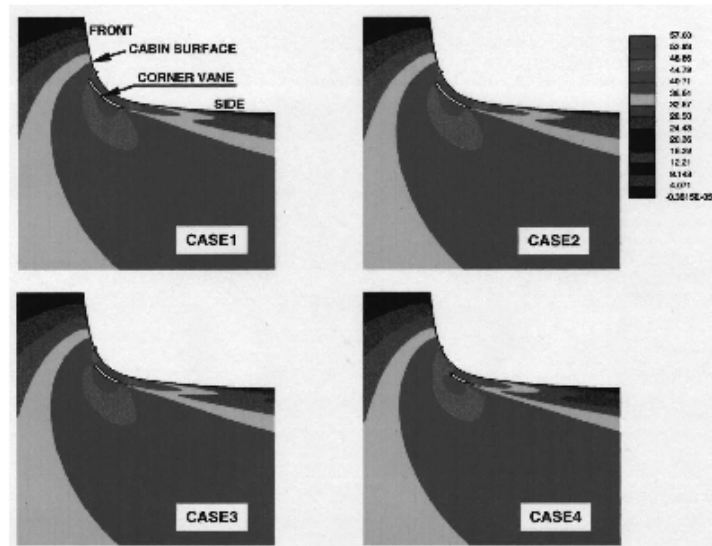


Fig.2 Velocity distribution around corner vane

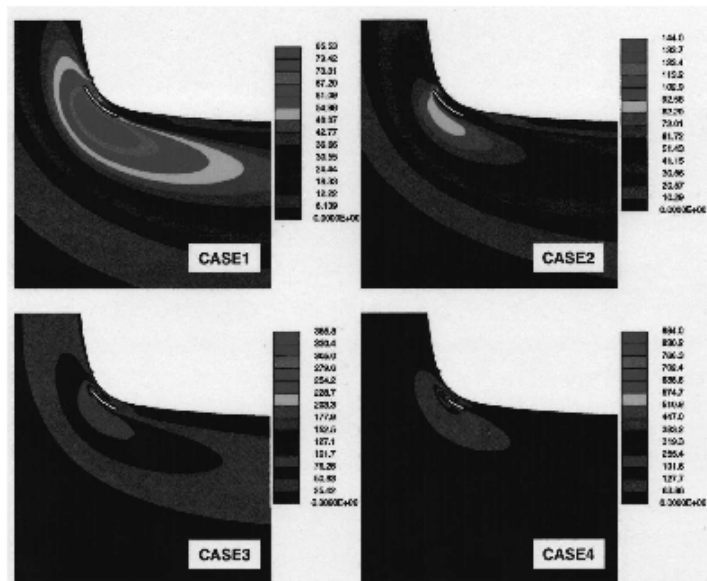


Fig.3 Turbulent kinetic energy around corner vane

난류 운동 에너지값이 증가하였다.
유량측면에서는 베인을 통과하는 통과 유량이 클수록 베인부착의 목적에 적합하므로 코너베인

을 통과하는 유량을 Fig.4에 도시하였다. Fig.2의 속도분포에서 알 수 있었듯이 CASE 4의 경우가 가장 취약하였고 CASE 2의 경우가 가장 유리하

였는데 코너베인을 통과하는 유량은 코너베인 길이변화에 따라 최대 3% 정도 차이를 보였다. 폭 변화에 따른 유동해석 결과 캐빈과 코너베인 사이의 간격을 30mm에서 48mm로 넓게 배치할 경우 최대 난류 운동에너지 값이 약 30%정도 감소하였다. 따라서 코너베인 부착시 코너베인 효과를 극대화하기 위해서는 베인을 통과하는 유량은 증가시키고 소음 감소측면에서 난류 운동에너지 값을 감소시킬 수 있도록 설계해야 할 것이다. 차량의 전면에서 주 유동 방향은 차량의 진행 방향이 아닌 좌우로 퍼지는 방향이기 때문에 유동이 급격히 변화하는 캐빈 모퉁이에 부착하는 코너베인의 설계시 이 부분의 유동간섭을 줄이기 위해서는 코너베인의 위치를 최대한 앞쪽에 위치시키고 폭 또한 외관 디자인의 허용 가능한 범위에서 최대한 넓게 설계하는 것이 유리할 것으로 사료된다.

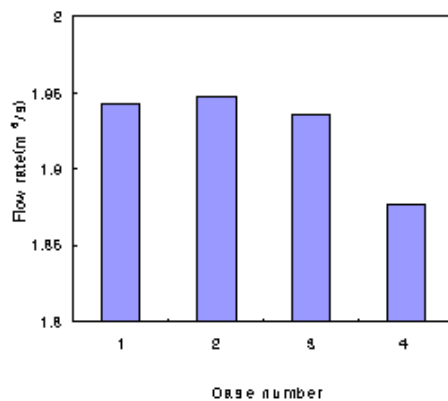


Fig.4 Flow rate with respect to the modification of length of corner vane ($W=30\text{mm}$, $Re=4.1 \times 10^6$)

3.2 코너베인 구조변경에 따른 유동특성

본 연구에서는 코너베인의 구조변경에 따른 유동특성을 고찰하였다. 캐빈 측면의 오염도 저감을 위한 코너베인 형상결정의 기초자료를 제공하고자 Fig.5와 같은 구조들에 대하여 해석 및 실험을 수행하였다.

Fig.5의 CASE A는 중앙 안내 가이드가 상단 및 하단부와 평행하게 놓여 통과하는 공기의 흐름이 두 영역으로 나뉘는 구조이고 CASE B와 CASE C 그리고 CASE D는 두 개의 안내 가이드

에 의해 세 영역으로 나뉘는 구조를 갖는다. 또한 CASE C와 CASE D는 각각 CASE B의 상단부와 하단부 베인각도에 변화를 준 형상이다. 코너베인 내부에 위치한 안내 가이드는 20° 의 기울기를 가지며 CASE C와 CASE D의 상단부와 하단부에 위치한 안내 가이드는 차량 하부 방향으로 15° 기울어진 형상이다.

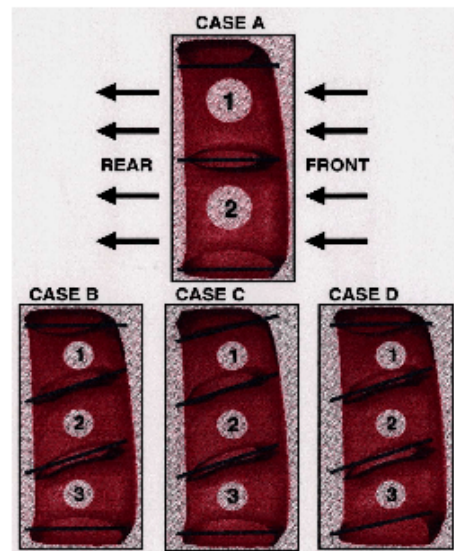


Fig.5 Structure of corner vane

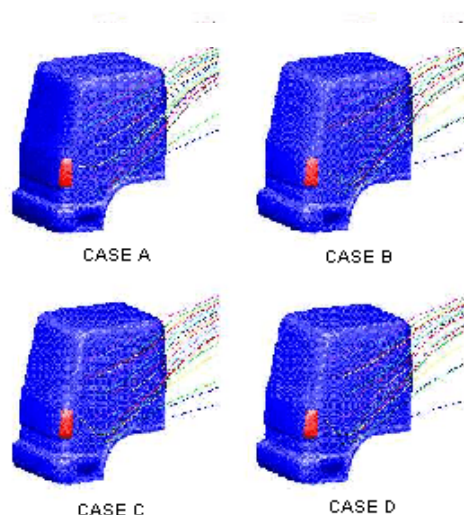


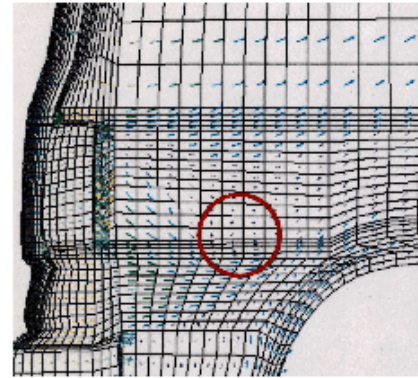
Fig.6 Particle tracking around corner vane

Fig.6에는 코너베인 내부 구조변경에 따른 캐빈 주위의 전반적인 유동형태를, Fig.7에는 캐빈 측면의 속도분포를 나타내었다. CASE A와 CASE B 모델을 부착한 경우의 유동형태를 비교해 보면 CASE B 모델이 베인주위에서 유동의 방향이 하향이기 때문에 지면으로부터 올라오는 오염물질의 차단에 상대적으로 더욱 효과적임을 알 수 있었다.

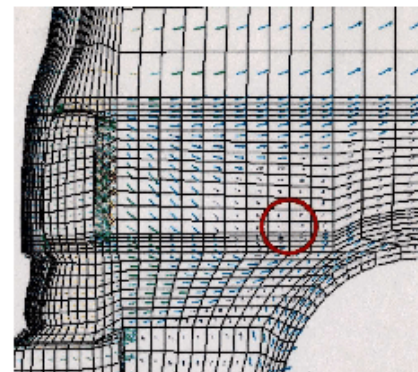
베인내부를 Fig. 5에 도시한 바와 같이 ①, ②, ③ 영역으로 구분해 볼 때 중간에 위치한 영역 ②에서는 가이드가 평행하기 때문에 변화가 없지만 영역 ①과 영역 ③에서는 넓어지고 좁아지면서 속도 에너지의 변화가 발생한다. CASE C 모델의 경우 하단부인 영역 ③을 통과하면서 유속이 빨라지긴 하지만 중간부분과 달리 내부 가이드의 방향이 한쪽만 기울어져 있기 때문에 중간부분을 통과하는 유동과 간섭될 우려가 있고 CASE D의 상단부인 영역 ①부분은 면적이 넓어지기 때문에 방향성 문제뿐만 아니라 유속이 감소하게 된다. Fig.7에서 원으로 표시한 부분은 지면으로부터 올라오는 유동과 베인을 통과하면서 발생하는 하향의 유동이 만나면서 속도가 감소한 부분을 나타낸 것인데 베인의 아랫부분을 평행하게 수정한 CASE D의 경우는 CASE B와 거의 유사한 유동을 보이고 있다. 반면 CASE C는 속도가 정체되는 구간이 다소 감소하고 있음을 보여준다. Fig.6에서도 CASE B와 CASE D의 경우 유동형태가 차이점이 없긴 하지만 CASE C의 경우에는 속도 정체 구간의 감소로 인해 그 부분의 유동이 상대적으로 완만함을 볼 수 있다. 즉 코너베인을 통과하면서 얻는 속도 에너지가 크게 감소되지 않고 유지되기 때문에 오염물질의 차단에 유리함을 의미한다.

해석의 유효성을 확보하고자 차량 주행상태에서 가시화 실험을 수행하였고 Fig.8에 실험결과를 도시하였다. 가시화 방법 중에는 유막법(oil-paint method), 터프트법(tuft method), 스모크 주입법(smoke streak method) 등이 있으나 본

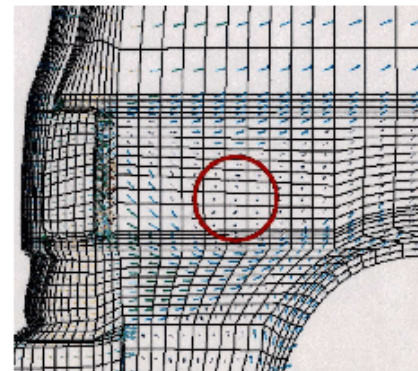
연구에서는 공기흐름의 방향을 추적하는 경우에



(a) CASE B



(b) CASE C



(c) CASE D

Fig.7 Vector plot around corner vane

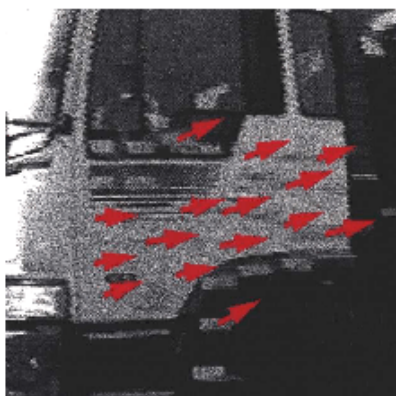
가장 쉽게 적용할 수 있는 터프트법을 사용하여

표면 흐름을 관찰하였다. 축소모형의 경우 터프트의 길이를 약 3cm 정도로 하나 본 연구에서는 실제차량을 사용하였기 때문에 약 10cm로 하였으며 셀로판 테이프를 이용하여 접착하였다.

시험자체가 풍동이 아닌 주행상태에서 이루어졌기 때문에 시험의 결과는 비정상상태의 유동인 반면 해석결과는 정상상태 유동이라는 차이점이 있긴 하지만 전반적인 유동형태가 정성적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.



(a) Cabin model without corner vane



(b) Cabin model with corner vane of CASE A



(c) Cabin model with corner vane of CASE B

Fig.8 Flow visualization for the structure variation of corner vane

Fig.8(a)와 Fig. 8(b)는 코너베인이 없는 경우와 CASE A 모델을 부착한 경우로써 전반적으로 코너베인 주위의 유동양상은 상향의 유동형태를 보이고 있으며 CASE B 모델을 장착한 Fig.8(c)의 경우 코너베인 주위의 유동이 하향의 유동형태를 나타내어 앞의 해석결과와 동일한 결과를 얻었다.

Fig.9에는 코너베인 구조에 따라 각 영역을 통과하는 유량을 도시하여 보았다. 전체적인 통과 유량은 CASE A 모델이 가장 큰 값을 나타내었고 CASE B 모델이 가장 취약하였으며 CASE C와 CASE D는 동등한 수준을 나타내었다. CASE B, C, D의 경우 각 영역으로 통과하는 유량은 중간에 위치한 영역 ②에서 가장 많았으며 영역 ③에서 가장 적거나 동등한 수준을 나타내었다. 또한 CASE C의 경우 영역 ①을 통과하는 유량이 상대적으로 가장 큰 값을 보여 코너베인 상단부의 유동을 제어하는데 효과적인 구조임을 알 수 있었다.

공기저항 측면에서는 Fig.10에 도시한 바와 같이 CASE B 모델이 가장 높게 나타났으며 CASE A 모델이 가장 유리하여 내부 구조가 평행하게 될 때 공기저항이 감소하게 되며 코너베인의 상단부를 내부 가이드와 동일하게 변경한 CASE C 모델의 경우 하단부를 변경한 CASE

D 모델에 비해 더 유리하였다. 따라서 코너베인의 상단부를 변경한 구조인 CASE C 모델이 통과하는 유량, 대표적인 공력특성인 공기 저항계수 그리고 오염도 저감을 위한 캐빈 측면의 유동 패턴 등을 고려해 볼 때 CASE B와 CASE D에 비해 상대적으로 유리한 구조임을 알 수 있었다.

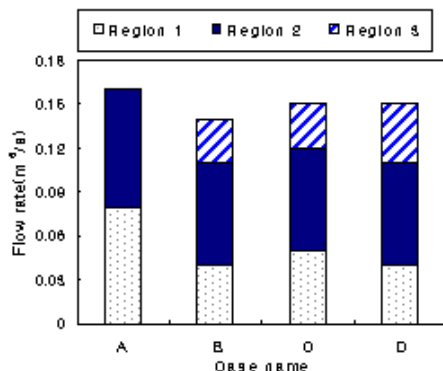


Fig.9 Air flow rate at each region of corner vane

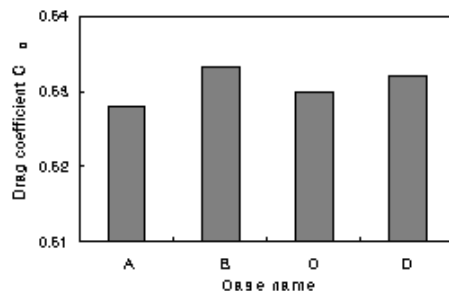


Fig.10 Drag coefficient

4. 결 론

트럭에 장착되는 코너베인의 장착위치 및 구조 변경에 따른 코너베인 주위 유동특성을 고찰하기 위하여 3차원 유동해석 및 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

차량 전면의 유동은 캐빈 모퉁이를 지나면서 유동의 방향이 급격히 변화하므로 이 부분의 유동간섭을 줄이고 공력 소음에 관련된 난류 운동 에너지 값 또한 감소시키기 위해서는 차량의 전면에 가압도록 설계하는 것이 유리하며 코너베인

을 통과하는 유량은 코너베인 길이 변화에 따라 최대 3% 정도 차이가 나타남을 알 수 있었다. 유동형태의 개선을 통하여 캐빈측면의 오염도를 저감하고자 구조변경에 따른 해석을 수행한 결과 CASE B 모델을 장착한 경우 유동저항은 가장 적은 값을 보이지만 유동형태의 개선효과는 거의 나타나지 않았고 CASE C 모델과 같이 모델 상단부를 변경한 경우가 하단부를 변경한 CASE D 모델보다 공기저항은 적게 하며 캐빈 측면의 오염도 또한 저감할 수 있는 구조임을 알 수 있었다. 또한 오염도 저감 측면에서 더욱 효과적인 개선모델을 얻기 위해서는 코너베인 만으로는 한계가 있으며 캐빈형상과 동시에 고려되어야 할 것으로 사료되며 본 연구의 결과들은 트럭차체의 공력특성 최적설계시 코너베인 형상결정을 위한 설계 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. G.J. Brown, "Aerodynamic Disturbances Encountered in Highway Passing Situations", SAE Paper No.730234, 1973.
2. Drollinger, R.A., "Heavy Duty Truck Aerodynamics", SP-688, 1988.
3. Takagi, M., "Application of Computers to Automobile Aerodynamics", Journal of Wind Engineering, No.37, 1988.
4. Fujii, H., Nishiyama, M., "Study on Estimation Method of Mud Deposit on Truck Cab", JSAE, Vol.39 No.5, 1985.
5. Shaw, C.T., "Predicting Vehicle Aerodynamics Using Computational Fluid Dynamics: A Users' Perspective", SAE Paper No.880455, 1988.
6. Philip M. Gerhart, Richard J. Gross, "Fundamentals of Fluid Mechanics", Addison Wesley, 1996.
7. Shago Nishikawa et al., "Computational Study of Three-Dimensional Flow around a Heavy-Duty Truck Body", JSAE Spring Convention Proceedings Paper No.901092, 1990.
8. Tsutomu Fujimoto et al., "Suppression of Mud Adhesion to a Rear Surface of a Van-Type Truck", SAE Paper No.920203, 1992.
9. M. Eugene Olson, Uwe W. Schaub, "Aerodynamics of Trucks in Wind Tunnels: The Important of Replicating Model Form, Model Detail, Cooling System and Test Condition", SAE Paper No.920345, 1992.
10. M.G.L. Cresswell and P.B. Hertz, "Aerodynamics Drag Implication of Exterior Truck Mirrors", SAE Paper No.920204, 1992.
11. Schaub, U.W., Olson, M.E. Raimondo, "Correction of Wind Tunnel Force Data for Yawed Full and Half-Scale Truck Models Using a Modified Pressure-Signature Method", SAE Paper No.900187, 1990.
12. Nishikawa, S. et al., "Numerical Simulation of Flow around a Heavy-Duty Truck Body", SAE Paper No.890599, 1989.
13. Thamgam, S. and Speziale, C.G., "Turbulent Flow Past a Backward-Facing Step: A Critical Evaluation of Two-Equation Models", AIAA Journal, Vol.3, No.5, pp.1314-1320, 1992.
14. Suhas, V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid", Hemisphere, New York, 1980.
15. 정수진, 김우승 "승용차 후향거울 주위의 3차원 유동 특성 해석", 한국자동차 공학회 논문집, 제5권, 제 3호, 1997.
16. Ryutaro Himenno et al., "Numerical Analysis of the Airflow around Automobile Using Multi-block Structured Grids", SAE Paper No.800319, 1980.
17. 유종열, 김사량, 강신형, 백세진, 이택식, 김용서, "단순화된 2차원 자동차형 물체 주위의 유동에 관한 실험적 연구", 대한 기계학회 논문집 제 13권 1호, pp.178-189, 1989.
18. 장성원, 유종열, 이택식, "승용차 모형 주위의 유동에 관한 연구", 한국 자동차 공학회지 제 12권 제 3호, pp.53-62, 1990.